

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Optická filtrace ve frekvenční oblasti
Optical filtration in frequency domain

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 6. května 2011

.....

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu práce Ing. Janu Skapovi, PhD. za odbornou pomoc při tvorbě bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem vlnové a Fourierovské optiky. Pomocí popisu Fourierovy transformace a Fourierovské optiky popisují problematiku optické filtrace v systému 4-f. V části experimentálního ověření se zabývám problematikou optické filtrace ve frekvenční oblasti v soustavě 4-f jak dolní, tak i horní propustí.

Klíčová slova: dolní propust, horní propust, čočka, filtrace, Fourier, Fourierovská optika, frekvenční oblast, laser, Matlab, optika, optická filtrace ve frekvenční oblasti, vlnová optika

Abstract

This thesis describes wave and Fourier optics. With the description of Fourier transformation and Fourier optics describes the problems of optical filtration in the 4-f system. In the experimental verification deals with optical filtration in the frequency domain in the 4-f system with lowpass and highpass.

Keywords: lowpass, highpass, lens, filtration, Fourier, Fourier optics, frequency domain, laser, Matlab, optics, optical filtration in frequency domain, wave optics

Obsah

Úvod.....	1
1. Světlo	2
1.1 Optická prostředí	3
1.2 Šíření světla.....	3
1.3 Odraz světla (reflexe).....	4
1.4 Lom světla (refrakce)	5
1.5 Snellův zákon	6
2. Vlnová optika.....	7
2.1 Difrakce.....	7
2.1.1 Definice difrakce.....	7
2.1.2 Typy difrakce	8
2.2 Disperze	9
2.3 Interference světla	9
2.3.1 Youngův interferenční pokus	11
2.3.2 Fázový rozdíl při Youngově pokusu	12
3. Fourierovská optika	14
3.1 Základy Fourierovské optiky	14
3.2 Optická filtrace ve frekvenční oblasti pomocí 4-f soustavy.....	15
4. Prostorová filtrace ve frekvenční oblasti	17
4.1 Dolní propust.....	17
4.2 Horní propust	17
4.3 Pásmová propust	18
5. Experimentální ověření.....	19

5.1	Ověření interference při použití dvou pinhole	19
5.2	Ověření interference při použití tří pinhole.....	21
5.3	Ověření interference při použití dvou štěrbin	24
5.4	Ověření interference při použití čtvercového otvoru	27
5.5	Optická filtrace ve frekvenční oblasti	29
5.5.1	Optická filtrace: dvě pinhole.....	29
5.5.2	Optická filtrace: dvě štěrby	34
Závěr		39
Literatura.....		40
Seznam příloh		41

Úvod

V dnešní době již kromě metalických vedení existuje i celá řada optických vedení a veškerá zařízení se dnes spíše orientují na optiku. Do budoucna se zcela jistě optická vedení a zařízení budou nadále prudce rozvíjet. Optická filtrace jednoho dne, možná, bude velmi důležitou součástí běžného přenosu dat. Proto je potřebné se důkladněji zabývat touto problematikou.

Má práce obsahuje pět základních kapitol : Světlo, Vlnová optika, Fourierovská optika, Prostorová filtrace ve frekvenční oblasti a Experimentální ověření.

V kapitole Světlo jsem se zaměřil na základní popis světla, jeho chování a vlastnosti. Dále v této kapitole popisuji, jakými zákony se světlo řídí při dopadu na překážku, popřípadě při průchodu z prostředí s menším indexem lomu do prostředí s větším indexem lomu a naopak.

Druhá kapitola - Vlnová optika - je zaměřena na popis vlnové optiky a její vlastnosti. V této kapitole jsou popsány základní jevy patřící do vlnové optiky.

Další kapitola se zabývá analýzou Fourierovy transformace a Fourierovské optiky a také pojednává a popisuje optickou filtrační soustavu 4-f.

V kapitole Prostorová filtrace ve frekvenční oblasti se zmiňuji podrobněji o optické filtraci ve frekvenční oblasti a popisuji jednotlivé frekvenční optické filtry - horní, dolní a pásmovou propust.

Poslední kapitola je zaměřena na samotné experimentální ověření interferenčních jevů a dalších optických jevů. V této části se věnuji samotnému experimentálnímu ověření optické filtrace ve frekvenční oblasti.

1.1 Optická prostředí

Optické prostředí je každé prostředí, kterým se šíří světlo. Všechna tato prostředí můžeme rozdělit podle jejich vlastností na optická prostředí z hlediska šíření elektromagnetického vlnění :

1. Průhledná: nedochází v něm ani k rozptylu světla, mohou být čirá nebo barevná.
2. Průsvitná: světlo částečně prochází, částečně se rozptyluje (matné sklo, papír).
3. Neprůhledná: světlo se na rozhraní s daným prostředím odráží nebo se v prostředí silně pohlcuje (zrcadla).

Optická prostředí rozdělujeme z hlediska vlastností v bodě:

1. Opticky homogenní: má v každém bodě stejné optické vlastnosti.
2. Opticky nehomogenní: opak opticky homogenního, nemá v každém bodě stejné optické vlastnosti.

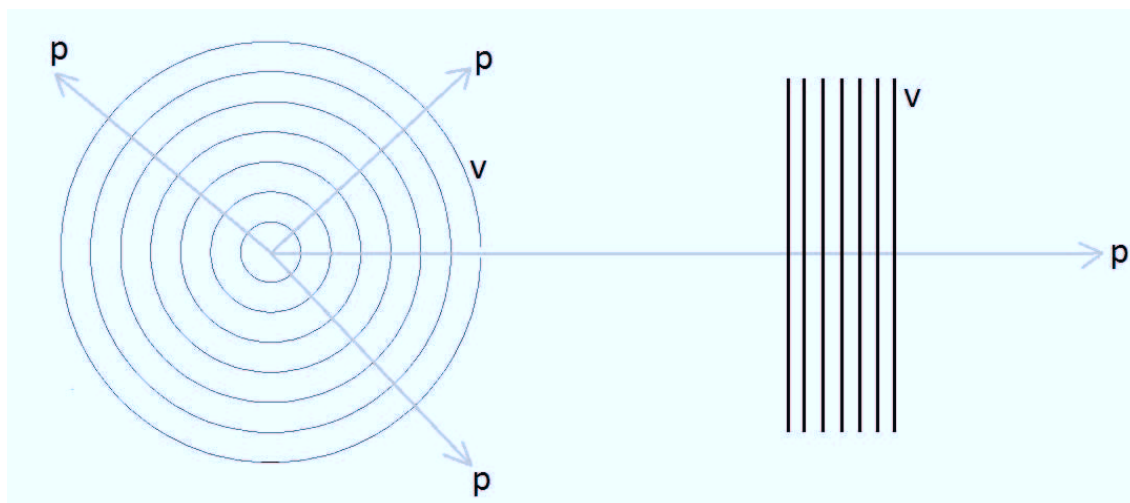
Podle závislosti rychlosti šíření vlnění na směru lze optické prostředí rozdělit na:

1. Opticky izotropní: v každém směru má stejné optické vlastnosti - tzn., že světlo se všemi směry šíří stejnou rychlostí.
2. Opticky anizotropní: opak opticky izotropního prostředí, v každém směru nemá stejné optické vlastnosti, rychlost šíření světla závisí na směru šíření.

V kapitole 1.1 jsem čerpal z [2].

1.2 Šíření světla

Šíření světla můžeme popsat podle Huygensova principu (viz. obr. 1.2). Podle něj se světlo z bodového zdroje šíří ve vlnoplochách. V blízkosti bodového zdroje světla, v izotropním prostředí, můžeme tyto vlnoplochy považovat za kulové. Ale naopak - ve velké vzdálenosti od bodového zdroje světla můžeme části těchto vlnoploch považovat za rovinnou vlnu.



obr. 1.2: Popis šíření vln pomocí Huygensova principu

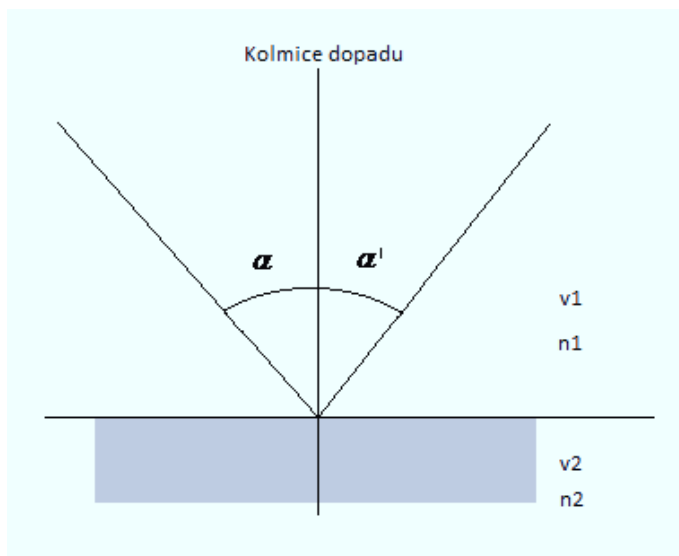
Přímky p nazýváme paprsky - jsou to myšlené přímky, které určují směr šíření světla a jsou vždy kolmé na vlnoplochu.

V roce 1679 fyzik Pierre de Fermat zjistil, že se světlo šíří mezi dvěma body vždy po nejkratší možné dráze, tzn. že si světlo „vybírá“ trajektorii, po níž se bude šířit co nejkratší možnou dobu. Tento jev se jmenuje Fermantův princip. Platí zákon přímočarého šíření světla: V homogenním prostředí musí být tato trajektorie přímka - světlo nemůže samovolně měnit svůj směr. Tento zákon je ovšem pouze zjednodušený, protože nezohledňujeme vlnové vlastnosti světla, konkrétně difrakci (ohyb). V kapitole 1.2 jsem čerpal z [3].

1.3 Odraz světla (reflexe)

Odraz světla nastává, když dopadne paprsek na rozhraní dvou optických prostředí a nemůže do druhého proniknout.

Zákon odrazu (viz. obr. 1.3): Úhel odrazu paprsku je roven úhlu dopadu, přičemž odražené paprsky zůstávají v rovině dopadu. Odraz nastává pouze tehdy, je-li : $\alpha > \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, kde n_2 a n_1 jsou indexy lomu daného prostředí a α je úhel dopadu.



obr. 1.3: Zákon odrazu světelného paprsku, $\alpha = \alpha'$

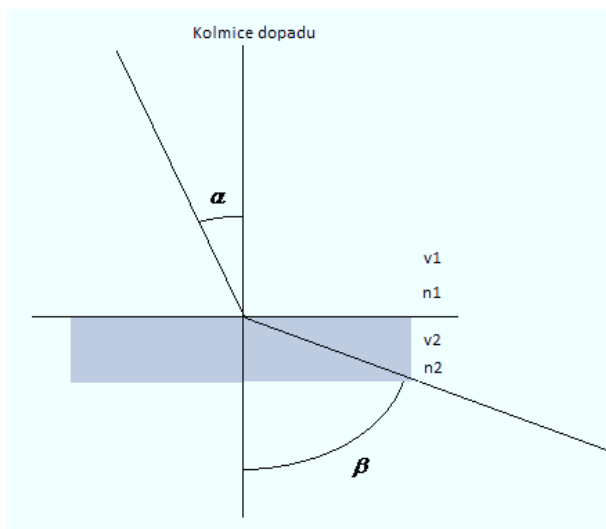
V kapitole 1.3 jsem čerpal z [3].

1.4 Lom světla (refrakce)

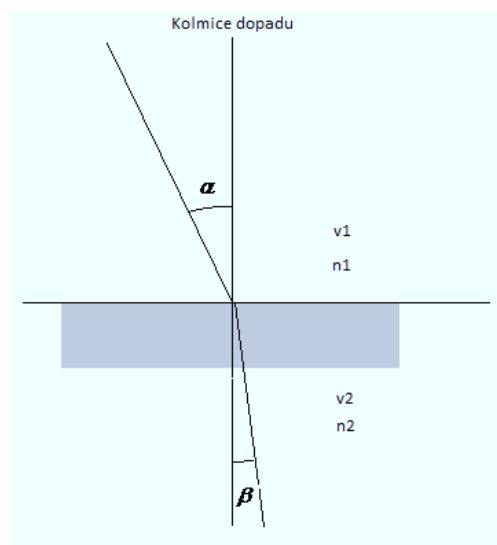
Lom světla nastává, když dopadne paprsek na rozhraní dvou optických prostředí a pronikne do druhého prostředí. Lom nastává, je-li : $\alpha < \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, kde n_2 a n_1 jsou indexy lomu daného prostředí a α je úhel dopadu.

Mohou nastat dvě varianty lomu světla :

- Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího prostředí se paprsky lámou směrem od kolmice - lom od kolmice (viz. obr. 1.4)
- Při šíření záření z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího prostředí se paprsky lámou směrem ke kolmici - lom ke kolmici (viz. obr. 1.5)



obr. 1.4: Lom světla od kolmice, $\alpha < \beta$



obr. 1.5: Lom světla ke kolmici, $\alpha > \beta$

V kapitole 1.4 jsem čerpal z [3].

1.5 Snellův zákon

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$, kde n_1 a n_2 jsou indexy lomu daného prostředí, α je úhel dopadu a β je

úhel odrazu. V kapitole 1.5 jsem čerpal z [3].

2. Vlnová optika

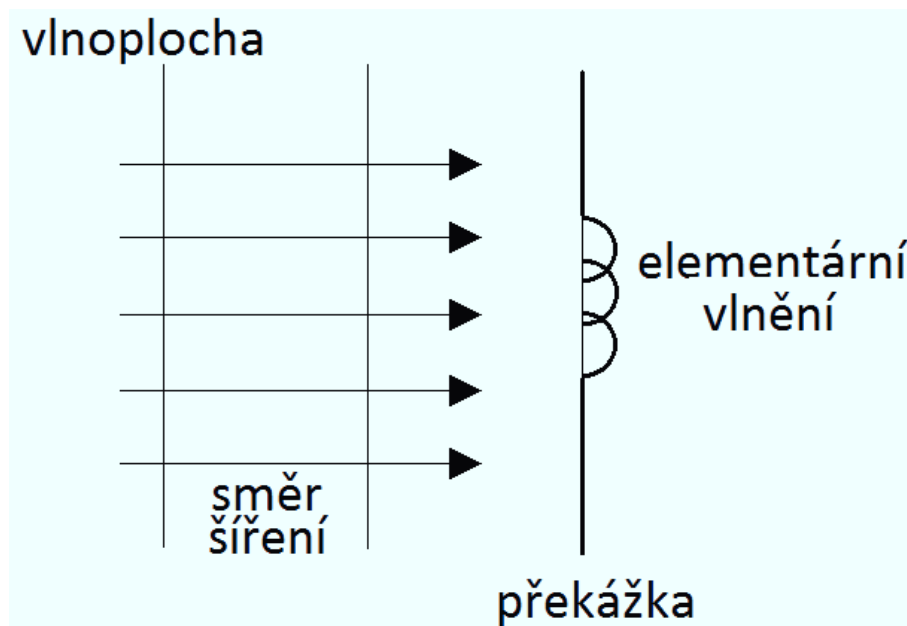
Vlnová optika zahrnuje světlo popsáno skalární (vlnovou) funkcí, která splňuje vlnovou rovnici. Vlnová rovnice může být vyjádřena každou ze složek elektrického nebo magnetického pole a společně se vztahy mezi vlnovou funkcí a hustotou optické energie vytvářejí postuláty skalárního vlnového modelu, později nazvaného vlnová optika. Vlnová optika tvoří základ pro popis mnoha optických jevů včetně interference a difrakce.

Vlnová optika není schopna poskytnout úplný obraz odrazu a lomu světla ani vysvětlit takové optické jevy, které vyžadují vektorový popis.

2.1 Difrakce

2.1.1 Definice difrakce

Světlo díky své vlnové povaze se za překážkou nešíří přímočaře a nevytváří přesnou, ostrou hranici stínu. V případě, použijeme-li stínítko, ve vhodné vzdálenosti zjistíme, že se světlo šíří do oblasti geometrického stínu. V případě šíření světla do stínu můžeme na stínítku pozorovat tzv. difrakční obrazec. Světlo se šíří ve formě kulových vlnoploch blízko u zdroje a ve větší vzdálenosti se šíří ve formě vlnoploch rovinných. To je způsobeno vlnovou povahou světla. V případě, že se vlnoplocha dostane na překážku s otvorem, stává se každý její bod zdrojem elementárního vlnění, které se šíří všemi směry (viz. obr 2.1.1). Světlo se za překážkou šíří ve formě kulové vlnoplochy z důvodu jevu, který nazýváme difrakce, nebo-li ohyb světla.



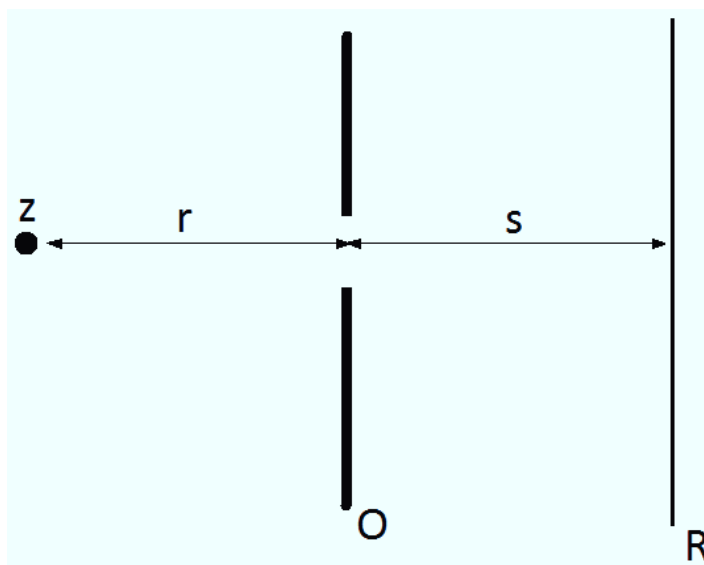
obr. 2.1.1: Schéma k vysvětlení vzniku elementárního vlnění

Jako překážka v prostu pro světlo může být buď otvor v předmětu pro světlo neprůchodném nebo nepropustná nehomogenita v prostředí, kde se světlo šíří. Otvor v překážce se nazývá apertura. V kapitole 2.1.1 jsem čerpal z [6].

2.1.2 Typy difrakce

Máme dva základní typy difrakcí - Fresnelovu a Fraunhoferovu difrakci. Rozdíly mezi těmito difrakcemi je poměrně těžké popisovat. Základním rozdílem je, že Fresnelovu difrakci většinou pozorujeme v konečné vzdálenosti. Naproti tomu Fraunhoferovu difrakci obvykle pozorujeme v ohniskové vzdálenosti čočky nebo v rovině, která je v nekonečnu.

Nejjednodušší příklad (viz. obr. 2.1.2) obsahuje pouze difraktující objekt O , zdroj světla Z , difrakční obrazec R a vzdálenosti r a s . Jsou-li r a s nekonečné jedná se o Fraunhoferovu difrakci, je-li s konečná a r buď konečná nebo nekonečná, jedná se o Fresnelovu difrakci.



obr. 2.1.2: Schéma nejjednoduššího uspořádání

V kapitole 2.1.2 jsem čerpal z [6].

2.2 Disperze

Disperze je rozložení bílého světla na jeho jednotlivé barevné složky. Bílé světlo je totiž složeno z jednotlivých jednoduchých světél (tzn. světél určité barvy). Nejčastěji k ní dochází na nějaké překážce (např. skleněný hranol). Rozlišujeme disperzi normální a anomální. U normální disperze se od přímého směru šíření odkloní nejvíce fialová složka světla, nejméně červená složka světla. U anomální disperze je tomu pak přesně naopak. V kapitole 2.2 jsem čerpal z [6].

2.3 Interference světla

Výrazným projevem vlnových vlastností světla, zejména u světla monochromatického, je interference. Jev spočívá ve skládání různých příspěvků vlnění v daném místě, v případě světla skládání příspěvků vlnění elektrického a magnetického pole. Jeho projevem je vznik interferenční struktury - u monochromatického světla se projevuje vznikem světlých a tmavých proužků či ploch, u bílého světla duhovostí. Pro pozorování interference

je důležitá koherence světla, tedy dobrá definovanost a uspořádanost světla (světlo z různých zdrojů má v daném místě stejnou fázi, neměnicí se s časem). U přirozených zdrojů se vlastnosti světla nezmění (světlo zůstane koherentní) jen na velmi malé vzdálenosti (0,01 mm). Teprve až s vynálezem laseru bylo umožněno pozorování interference při větších dráhových rozdílech (až několik metrů).

Obecně lze říci, že jsou-li kdekoliv v prostoru přítomny dvě nebo více vln, je výsledná vlna součtem jednotlivých vln, uplatňuje se princip superpozice. Toto je obecná vlastnost platná v rámci lineární optiky, tedy pokud prostředí není ovlivňováno vlnou samo o sobě. Pokud ovšem k takovýmto změnám v prostředí dochází (např. pro dostatečně silné optické vlny srovnatelné s vnitřními poli mezi jednotlivými stavebními částicemi látky), není již možno vlny jednoduše skládat a pohybuje se potom v oblasti tzv. nelineární optiky. V nelineární optice se tedy index lomu prostředí mění podle charakteru dopadajícího světla. I samotné světlo se může při průchodu nelineárním prostředím změnit, např. co se týče jeho frekvence (modré se změní na červené apod.). Jinými slovy: záření je ovlivněno zářením přes interakci s prostředím, které generuje záření nové, které se skládá se zářením původním. Podle toho, jaký je vztah mezi polem vybuzeným a polem dopadajícím, hovoří se o nelineárních jevech určitého řádu. Tak například mezi jevy druhého řádu (kvadratické) patří zdvojnásobování frekvence světelné vlny, směšování dvou vln a generování součtových nebo rozdílových frekvencí.

I v rámci lineární optiky lze ovšem počítat pouze vlny jako takové (přesněji jejich komplexní amplitudy), a ne již intenzity těchto vln. Intenzita superpozice dvou či více vln totiž obecně není součtem intenzit jednotlivých vln. Důvodem je právě vzniklá interference mezi vlnami.

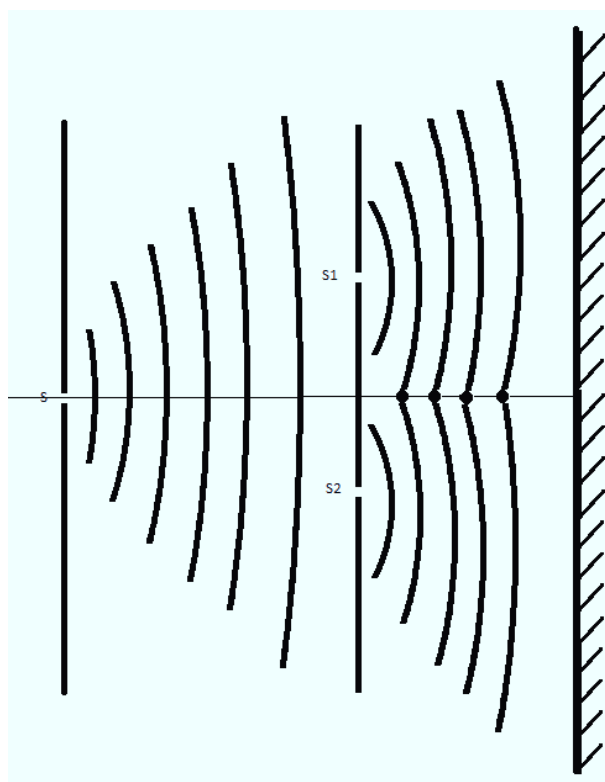
Jestliže je tedy první vlna dána: $U_1 = \sqrt{I_1} \cos(\varphi_1)$, kde I_1 je intenzita vlny, a φ_1 je její fáze, a totéž pro druhou vlnu: $U_2 = \sqrt{I_2} \cos(\varphi_2)$, potom je celková intenzita dána tzv. interferenční rovnicí $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi)$, kde $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ je fázový rozdíl obou vln.

V této rovnici můžeme pozorovat, že interferenční člen si v sobě nese informaci o fázích obou vln (přesněji řečeno o jejich fázovém rozdílu), čehož se využívá v holografii. Interference představuje možnost prostorového přerozdělení optické intenzity: celková intenzita obou vln je $I_1 + I_2$, je však přerozdělena podle fázových rozdílů do oblastí s intenzitou větší a do oblastí

s intenzitou menší. Jevu interference využívají optické přístroje zvané interferometry. V kapitole 2.3 jsem čerpal z [1] a [5].

2.3.1 Youngův interferenční pokus

Interferenci lze pozorovat například při Youngově pokusu. V roce 1801 Thomas Young experimentálně prokázal, že světlo se chová jako vlnění. Většina fyziků té doby předpokládala, že světlo je proud částic. Thomas Young ukázal světu, že světlo vykazuje interferenci jako např. voda na hladině nebo zvukové vlny. Kromě toho se mu podařilo poměrně přesně změřit vlnovou délku slunečního záření. Hodnotu vlnové délky slunečního záření určil jako 570nm. Dnes se za správnou hodnotu považuje 555nm. Popis tohoto pokusu mám poslouží jako příklad interference vln (viz. obr. 2.3.1).



obr. 2.3.1: Youngův interferenční pokus

Z obrázku (viz.obr. 2.3.1) je zřejmé, že světlo z velmi intenzivního zdroje (např. laser) necháme nejdříve projít malým kruhovým otvorem označeným S. Z tohoto bodu se světlo šíří ve formě kulových vlnoploch (tento jev nazýváme difrakce). Poté necháme světlo dopadnout na stínítko se dvěma obdobnými malými otvory S1 a S2. Pro tyto účely je nejpraktičtější použít dvě velmi úzké, rovnoběžné a blízko ležící štěrbin, které způsobí jev mnohem světelnější.

Na vzdáleném stínítku budeme pozorovat výsledný jev a to v rovině kolmé ke štěrbinám. Na stínítku budeme pozorovat (při monochromatickém osvětlení) tmavé a světlé proužky, kterých je značné množství. V případě bílého světla budeme pozorovat dva nebo tři zabarvené proužky kolem středního bílého maxima a rychle se ztrácející, v okamžiku překrývání se barev. Vzniklý obrazec na koncovém stínítku nazýváme interferenční obrazec. Světlé proužky zobrazují vlastně dílčí lokální interferenční maxima, zatímco tmavé proužky jsou dílčí lokální interferenční minima. Na obrázku výše (obr.3.3.1) dochází ke vzniku interferenčního maxima právě na středové ose v místech průsečíků vlnoploch. Dílčí interferenční maxima pak vznikají v dalších průsečících těchto vlnoploch mimo tuto středovou osu. V kapitole 2.3.1 jsem čerpal z [1] a [5].

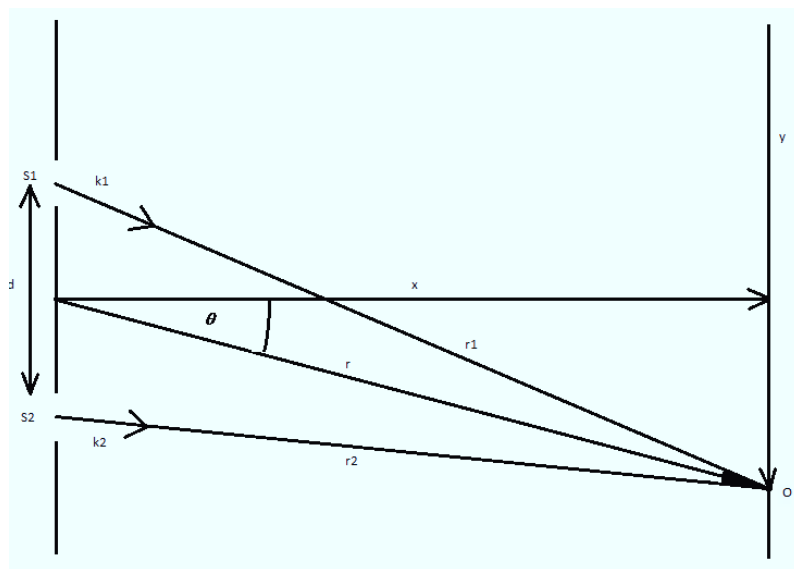
2.3.2 Fázový rozdíl při Youngově pokusu

Obě vlny vycházející ze štěrbin S1 a S2 (viz.obr. 2.3.1) mají zpočátku stejnou fázi, protože jsou částmi jedné vlnoplochy. Mají-li se ovšem sejít v libovolném bodě O na stínítku, musí každá urazit dráhu jiné délky. Šíří-li se dvě vlny různě dlouhými drahami, může se jejich fázový rozdíl změnit. Změna fázového rozdílu je tedy způsobena rozdílnou délkou drah Δl , kterými se vlny šíří. V případě, že je Δl rovno nule nebo se rovná celočíselnému násobku vlnové délky, dorazí vlny na stínítko ve fázi a interferují konstruktivně a to znamená, že bod leží ve světlém proužku. V případě, kdy je Δl lichý násobek poloviny vlnové délky, dopadají vlny do bodu O přesně v opačné fázi a interferují destruktivně - bod O leží ve tmavém proužku. Existují i hodnoty, které nevyhovují těmto podmínkám. Tyto body pak leží mezi světlými a tmavými proužky.

Pro interference maxim platí : $d \cdot \sin \theta = k\lambda$, pro interference minim platí:
 $d \cdot \sin \theta = (k + \frac{1}{2})\lambda$, kde θ je úhel, který svírá spojnice bodu O se středem mezi štěrbinami
 a středovou osou, d je osová vzdálenost štěrbin (viz.obr. 2..3.2) a k může nabývat hodnot
 kladného celého čísla včetně nuly.

Aby se nám interferenční obrazec objevil, musí být světelné vlny koherentní, tzn. fázový
 rozdíl světelných vln dopadajících do společného bodu v závislosti na čase se nemění.

Světelné vlny jsou koherentní tehdy, když je jejich fázový rozdíl stále stejný. Přímé sluneční
 záření je koherentní pouze z části. To znamená, že vlny slunečního záření dopadající do dvou
 bodů mají konstantní fázový rozdíl pouze tehdy, když jsou štěrbin y velmi blízko u sebe.



obr. 2.3.2: Geometrie k Youngově pokusu

V kapitole 2.3.2 jsem čerpal z [1] a [5].

3. Fourierovská optika

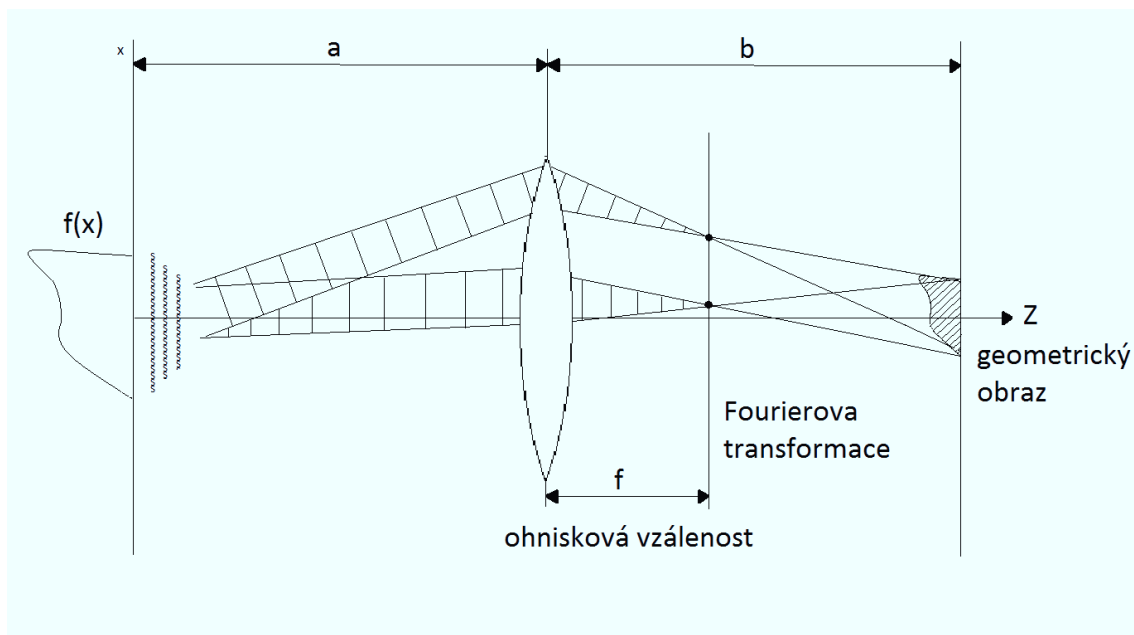
Fourierovská optika využívá Fourierovu transformaci. Fourierova transformace je matematická metoda, která dovoluje analyzovat průběh libovolného fyzikálně realizovatelného signálu a převést jej na součet sinusových a cosinusových signálů vhodných frekvencí a amplitud.

Fourierova transformace je modifikací Fourierovy řady a je užitečná pro řešení mnoha různých problémů. Používá se např. pro převedení řešení diferenciálních rovnic na řešení algebraických rovnic nebo pro frekvenční analýzu časově proměnných signálů. V oblasti zpracování obrazů je možné Fourierovu transformaci uplatnit pro úpravy kvality obrazů, tedy i pro prostorovou filtraci ve frekvenční oblasti. V kapitole 3 jsem čerpal z [1], [4] a [7].

3.1 Základy Fourierovské optiky

V dnešní době se při pohledu na optiku a optické zobrazování používá Fourierova transformace (viz. obr. 3.1). Amplituda světelného svazku vycházejícího z předmětu, který chceme zobrazit (ten se nazývá zobrazovaný předmět), se rozkládá na prostorově monochromatické, harmonické složky. Jednotlivé složky poté procházejí zobrazovacími prvky nezávisle. Tyto složky lze tedy zpracovávat jednotlivě, popřípadě zcela odstranit, potlačit různými filtry a tím ovlivňovat výsledný obraz, tak jak potřebujeme. Tohoto jevu můžeme využívat při prostorové filtraci jednotlivých složek (viz. kap. prostorová filtrace ve frekvenční oblasti) v systému 4-f.

Ve Fourierovské optice je pro nás důležité, že čočka ve své zadní ohniskové rovině vytváří rozložení amplitudy světla, která je úměrná Fourierově transformaci amplitudy světla v rovině zobrazovaného předmětu (viz. obr. 3.1).

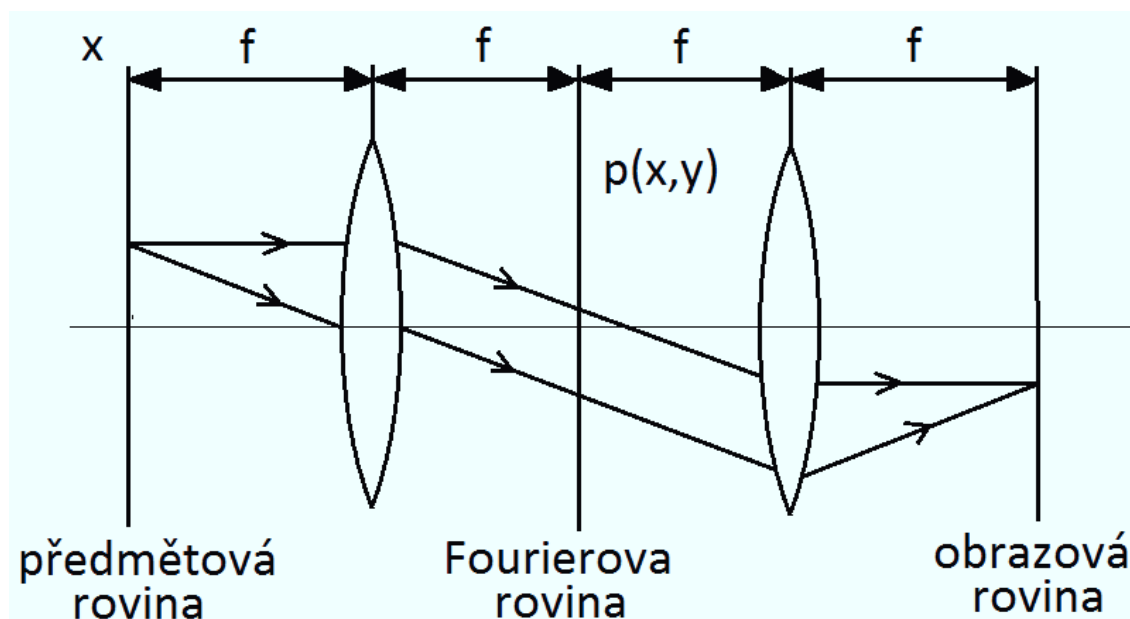


obr. 3.1: Optické zobrazování z hlediska Fourierovy transformace

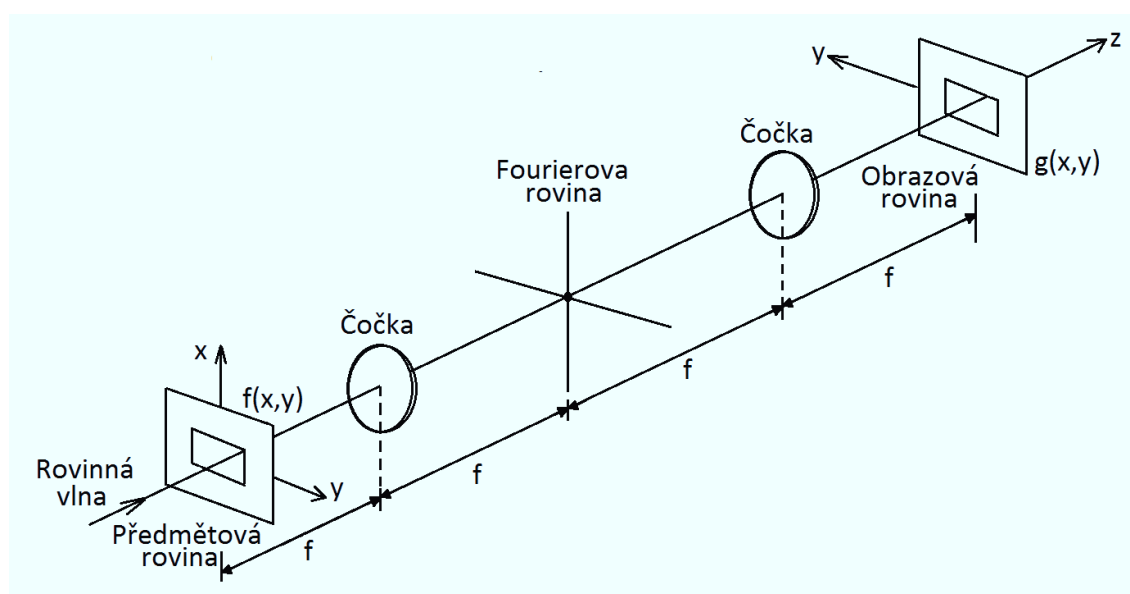
V kapitole 3.1 jsem čerpal z [1] a [4].

3.2 Optická filtrace ve frekvenční oblasti pomocí 4-f soustavy

Pro studium Fourierovy transformace a optické filtrace ve frekvenční oblasti je velmi výhodné použít dvoučočkový systém 4-f (viz. obr. 3.2.1). Popis obrázku (viz. obr. 3.2.1) zleva. Předmět je umístěn vlevo v předmětové rovině první čočky. Za první čočkou ve Fourierově rovině vzniká Fourierova transformace původního signálu. Druhá čočka vytvoří inverzní Fourierovu transformaci, takže signál zobrazený v obrazové rovině je příčně zvětšený $-1\times$ a obraz je tedy roven převrácené replice předmětu. To vyplývá z chodu paprsků na obrázku (viz. obr. 3.2.1). Systém 4-f je vlastně složený ze dvou subsystémů. Každý z nich vytváří Fourierovu transformaci. Tento systém se nazývá systém 4-f nebo koherentní optický procesor. Příklad využití systému 4-f máme na obrázku (viz. obr. 3.2.2). Signál se tedy ve Fourierově rovině v tomto systému rozloží na jednotlivé harmonické složky, které je možno určitým filtrem omezit (viz. kap. 4), či je jinak upravovat. Touto frekvenční filtrace můžeme tedy signál upravovat, a to jak rysy geometrického obrazu tak i kontrast apod.



Obr. 3.2.1: Dvoučočkový zobrazovací systém 4-f



Obr. 3.2.2: Koherentní optický procesor (systém 4-f) pro studium optické Fourierovy transformace

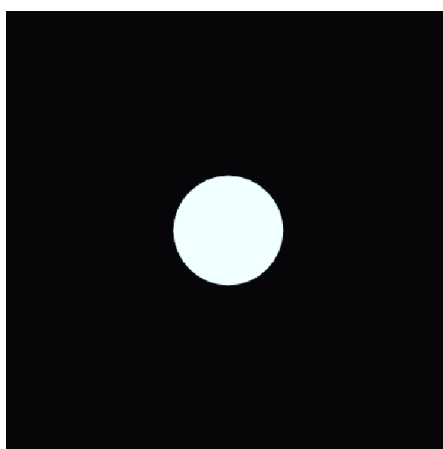
V kapitole 3.2 jsem čerpal z [4].

4. Prostorová filtrace ve frekvenční oblasti

Pod pojmem filtrace rozumíme proces, při němž se určitá část daného signálu propouští a jiná část zadržuje či zeslabuje. Nástroj pro tuto filtraci se nazývá filtr. V našem případě používáme prostorový filtr. V případě optiky nelze tento proces vrátit zpět, dochází tedy k nevratné ztrátě dat-informací. V kapitole 4 jsem čerpal z [4].

4.1 Dolní propust

Prostorový filtr typu dolní propusti (viz.obr.4.1) propouští prostorové frekvence menší, než je určitá mezní prostorová frekvence, daná velikostí tohoto filtru. V praxi je tento filtr realizován aperturou s kruhovým otvorem. Aplikace tohoto filtru se projeví rozmazáním obrazu, protože vysoké frekvence spojené s detaily obrazu jsou ořezány.



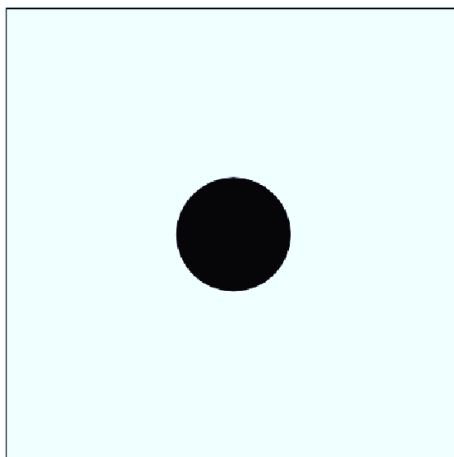
obr. 4.1: Dolní propust

V kapitole 4.1 jsem čerpal z [1].

4.2 Horní propust

Filtr typu horní propusti (viz.obr.4.2) naopak blokuje nízké prostorové frekvence a propouští vysoké. Masku tvoří průzračný transparent s neprůsvitným kruhem uprostřed. Výstup z filtru

má vysokou úroveň v místech, kde je míra změn objektu velká, a nízkou tam, kde jsou změny malé. Filtr se proto používá ke zvýraznění hran při optickém zvýraznění obrazu.

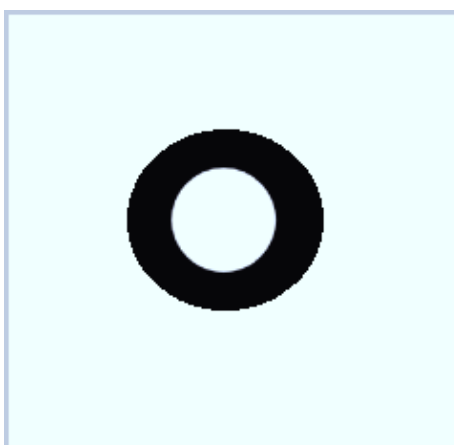


obr. 4.2: Horní propust

V kapitole 4.2 jsem čerpal z [1].

4.3 Pásmová propust

Pásmová propust (viz.obr.4.3) blokuje pásmo prostorových frekvencí. Propouští prostorové frekvence menší, než je určitá mezní frekvence, daná velikostí tohoto filtru a zároveň propouští prostorové frekvence větší, než je určitá mezní prostorová frekvence, daná velikostí tohoto filtru.



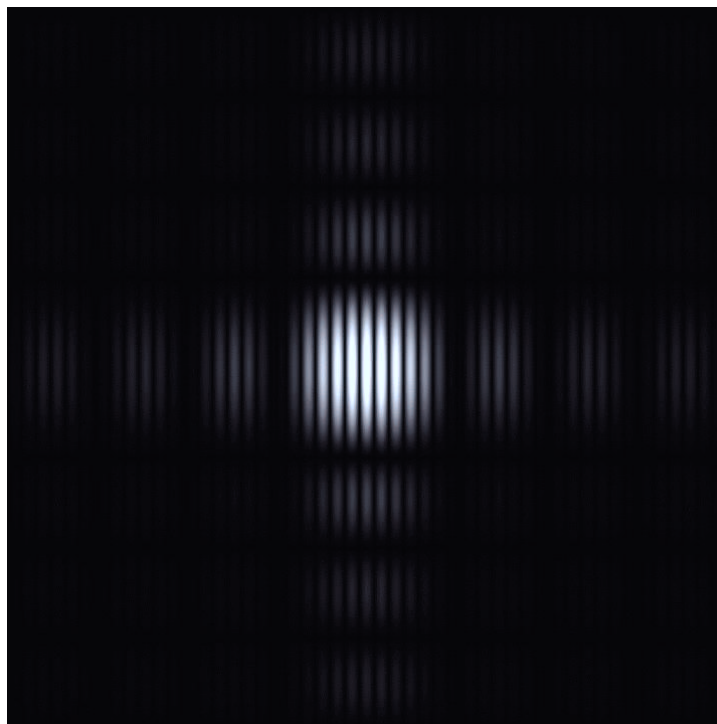
obr. 4.3: Pásmová propust

V kapitole 4.3 jsem čerpal z [1].

5. Experimentální ověření

5.1 Ověření interference při použití dvou pinhole

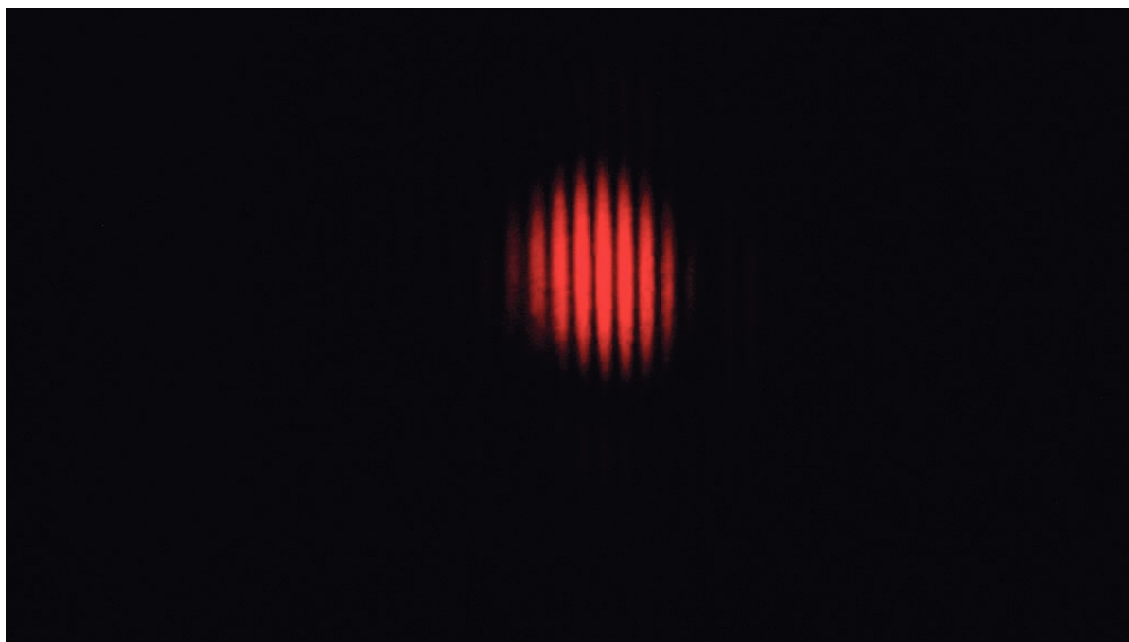
Prováděl jsem měření, při kterém jsem použil soustavu 4-f, výkonný laser třídy IIIb - Melles Griot 25-LHP-151-230 o vlnové délce 632,8 nm a program Matlab. V soustavě 4-f jsem umístil bi-konvexní sférické čočky Edmund DCX 40 X 400. Do předmětové roviny v soustavě 4-f jsem umístil clonu se dvěma pinhole. Pinhole byly umístěny velmi blízko u sebe a jejich rozměry byly velmi malé. Průměr pinhole byl přibližně půl milimetru a jejich vzájemná vzdálenost byla přibližně milimetr. Na tuto předmětovou rovinu jsem svítil výkonným laserem. Svazek světla prošel soustavou 4-f, tedy dorazil na obrazovou rovinu. Pozoroval jsem obrazce, které se v obrazové rovině projeví. Z těchto obrazců jsem v programu Matlab vytvořil amplitudové spektrum (viz.obr. 5.1.3). Pro porovnání jsem vytvořil simulaci v programu Matlab (viz.obr. 5.1.1), která měla zobrazovat stejný obrazec, jaký jsem pozoroval v obrazové rovině (viz.obr. 5.1.2).



obr. 5.1.1: Simulace měření se dvěma pinhole - interference

V obrázcích (viz. obr. 5.1.1 a 5.1.2) jsou pozorovatelné odchylky, rozdíly. Tyto rozdíly jsou způsobeny několika vlivy, které jsou popsány níže.

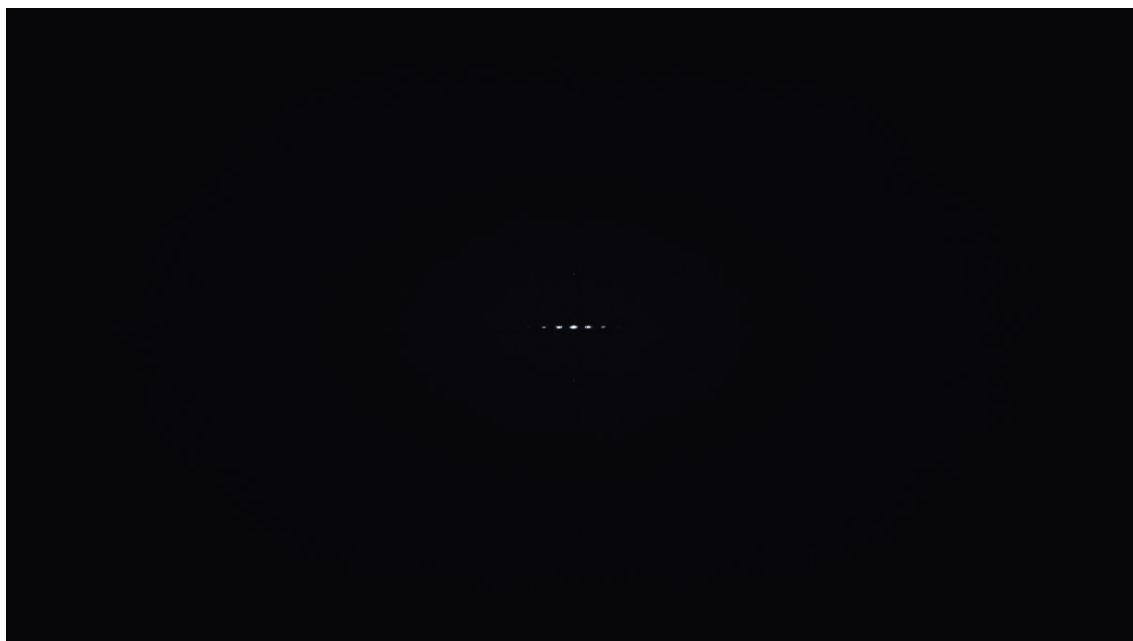
Ve středu obrazce byly pozorovatelné tyto rozdíly: simulace z programu Matlab je čtvercového tvaru a v experimentálním ověření jsem pozoroval obal obrazce kruhového tvaru. To je způsobeno rozdílným zpracováním obou obrazců. Rychlá Fourierova transformace v programu Matlab používá transformaci pro každý bod zvlášť, tedy zpracovává obrazec postupně v Kartézské soustavě souřadnic. Ovšem v experimentálním ověření je výsledný obrazec ovlivněn vlastnostmi čočky v soustavě 4-f, která zpracovává světlo dokola v závislosti na úhlu a vzdálenosti od středu čočky.



obr. 5.1.2: Experimentální ověření - dvě pinhole

V blízkém okolí středu obrazce byly pozorovatelné tyto rozdíly: v simulaci z programu Matlab pozorujeme ve větší vzdálenosti od středu obrazce jakési vodorovně a svisle jdoucí pruhy, uspořádané do pomyslného kříže, procházejícího středem obrazce. Tyto pruhy jsem v experimentálním ověření pozoroval jen velmi omezeně. Je to způsobeno tím, že vysoké prostorové frekvence, které se v této oblasti vyskytují, nemají dostatečnou intenzitu, která by byla viditelná pouhým okem.

Amplitudové spektrum simulace v Matlabu (viz.ob.5.1.3) je vlastně amplitudové spektrum rovinných vln, které bych musel použít v případě, kdybych chtěl zrekonstruovat obrazec (viz.obr. 5.1.2). Ovšem já v experimentálním ověření používám dvě pinhole, za kterými se světlo šíří ve formě kulové vlny. Z tohoto důvodu amplitudové spektrum neodpovídá cloně v předmětové rovině.



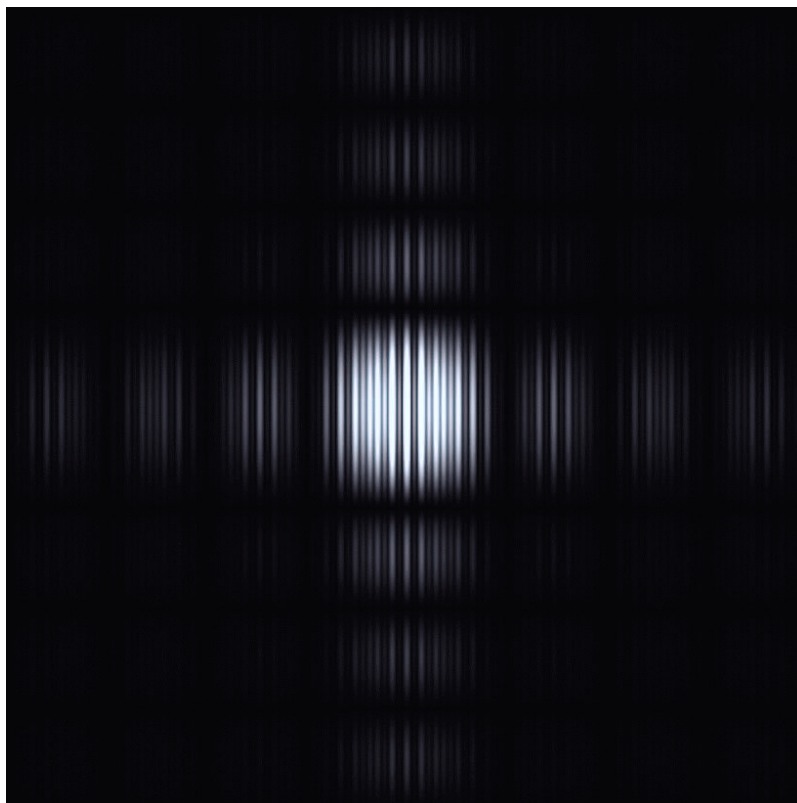
obr. 5.1.3: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - dvě pinhole

5.2 Ověření interference při použití tří pinhole

Opět jsem prováděl měření, při kterém jsem použil soustavu 4-f, výkonný laser třídy IIIb - Melles Griot 25-LHP-151-230 o vlnové délce 632,8 nm a program Matlab. V soustavě 4-f jsem umístil bi-konvexní sférické čočky Edmund DCX 40 X 400. Do předmětové roviny v soustavě 4-f jsem umístil clonu se třemi pinhole. Pinhole byly umístěny velmi blízko u sebe a jejich rozměry byly velmi malé. Průměr pinhole byl přibližně půl milimetru a jejich vzájemná vzdálenost byla přibližně dva milimetry. Na tuto předmětovou rovinu jsem svítil výkonným laserem. Svazek světla prošel soustavou 4-f, tedy dorazil na obrazovou rovinu. Pozoroval jsem obrazce, které se projeví v obrazové rovině. Z těchto obrazců jsem poté v programu Matlab vytvořil amplitudové spektrum (viz.obr. 5.2.3). Pro porovnání jsem vytvořil simulaci

v programu Matlab (viz.obr. 5.2.1), která měla zobrazovat stejný obrazec, který jsem pozoroval v obrazové rovině.

Na rozdíl od obrazce se dvěma pinhole (viz obr. 5.1.1) jsou ve středu obrazce (viz obr. 5.2.1) pozorovatelné nesouměrné svislé pruhy.



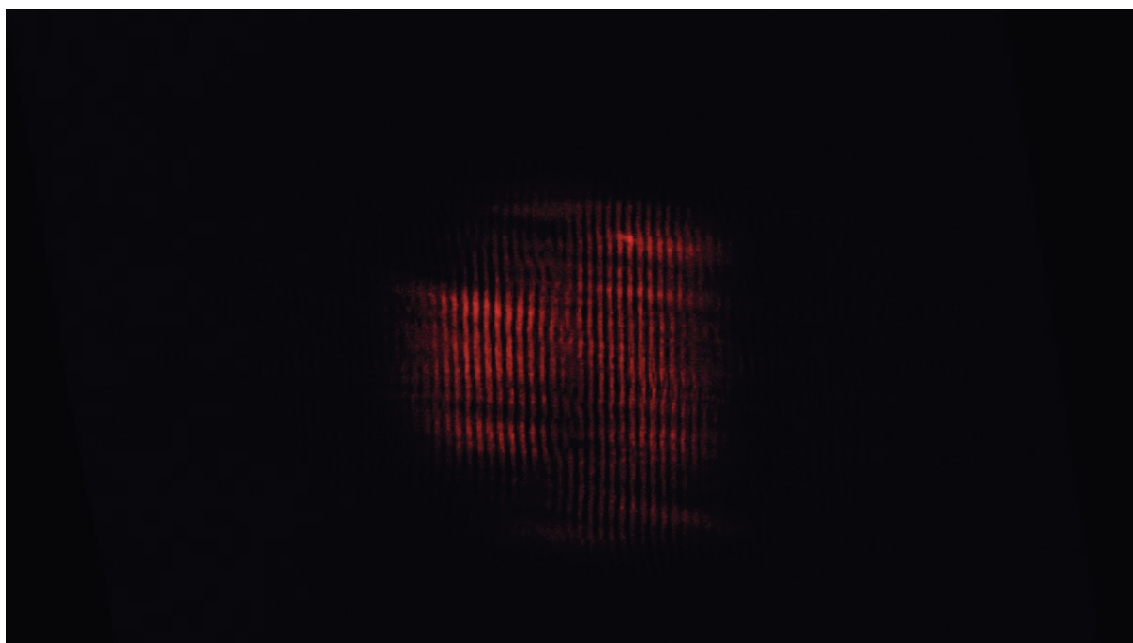
obr. 5.2.1: Simulace měření se třemi pinhole - interference

V obrazcích (viz. obr. 5.2.1 a 5.2.2) jsou pozorovatelné odchylky, rozdíly. Tyto rozdíly jsou způsobeny několika vlivy, které jsou popsány níže.

Ve středu obrazce byly pozorovatelné tyto rozdíly: simulace z programu Matlab je čtvercového tvaru a v experimentálním ověření jsem pozoroval obal obrazce připomínající čtverec, ovšem některé vyšší prostorové frekvence nejsou okem dobře pozorovatelné. Tyto vyšší frekvence mají nedostatečnou intenzitu pro pozorování. Zároveň to způsobuje technika zpracování obrazců. Fourierova transformace v programu Matlab používá rychlou Fourierovu transformaci pro každý bod zvlášť, tedy zpracovává obrazec postupně v Kartézské soustavě

souřadnic. Ovšem v experimentálním ověření mi výsledný obrazec ovlivňují vlastnosti čočky v soustavě 4-f, která zpracovává světlo dokola v závislosti na úhlu a vzdálenosti od středu čočky, tedy se nezobrazují přesné rohy čtverce. Ve svislém směru ve středu pomyslného čtverce vidíme nesouměrnosti, které odpovídají simulaci z programu Matlab.

V blízkém okolí středu obrazce byly pozorovatelné tyto rozdíly: V simulaci z programu Matlab pozorujeme ve větší vzdálenosti od středu obrazce jakési vodorovně a svisle jdoucí pruhy. Tyto pruhy jsem v experimentálním ověření vůbec nepozoroval. Je to způsobeno tím, že vysoké prostorové frekvence, které se v této oblasti vyskytují nemají dostatečnou intenzitu, která by byla viditelná pouhým okem.



obr. 5.2.2: Experimentální ověření - tři pinhole - interference

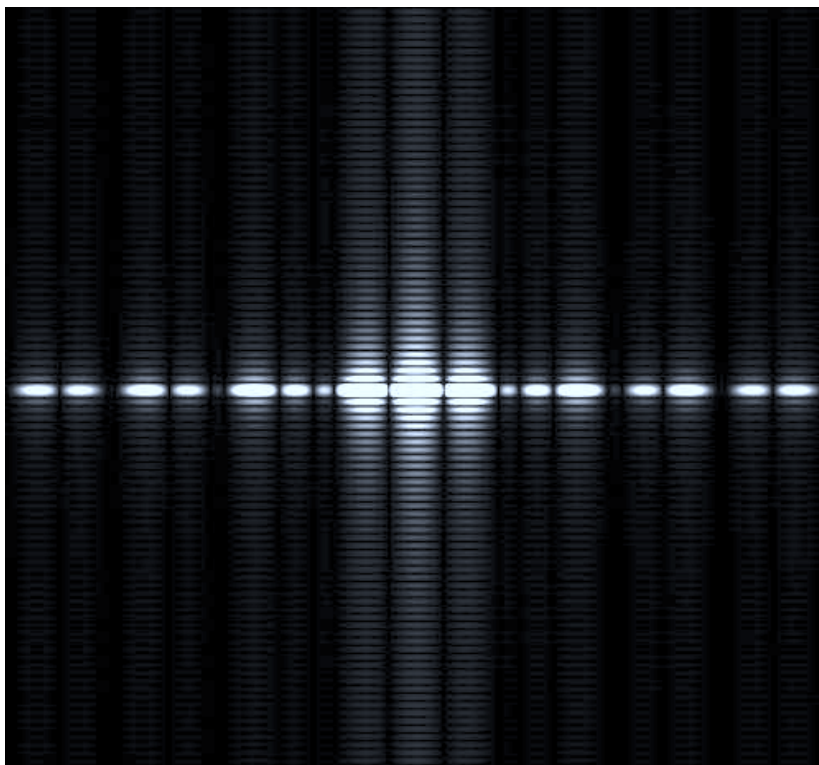
Amplitudové spektrum simulace v programu Matlab (viz.obr. 5.2.3) je vlastně amplitudové spektrum rovinných vln, které bych musel použít v případě, kdybych chtěl zrekonstruovat obrazec (viz.obr. 5.2.2). Ovšem já v experimentálním ověření používám tři pinhole, za kterými se světlo šíří ve formě kulové vlny. Z tohoto důvodu amplitudové spektrum neodpovídá cloně v předmětové rovině.



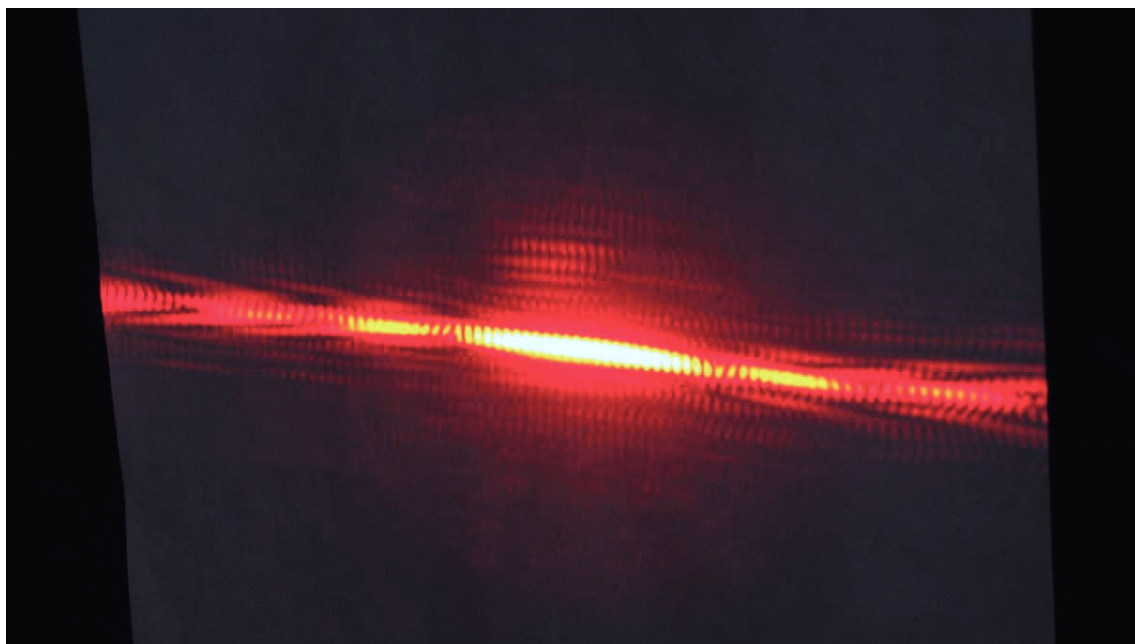
obr. 5.2.3: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - tři pinhole

5.3 Ověření interference při použití dvou štěrbin

V tomto experimentu používám stejné přístroje jako v pokusu se dvěma pinhole (viz.kap.5.1) s jediným rozdílem - jako clonu v předmětové rovině jsem umístil dvě štěrby, které byly svislé a rovnoběžné. Šířka štěrbin byla přibližně čtvrt milimetru a výška půl centimetru. Opět se pokusím srovnat výsledky z programu Matlab (viz.obr. 5.3.1) a experimentálně ověřené výsledky (viz.obr. 5.3.2).

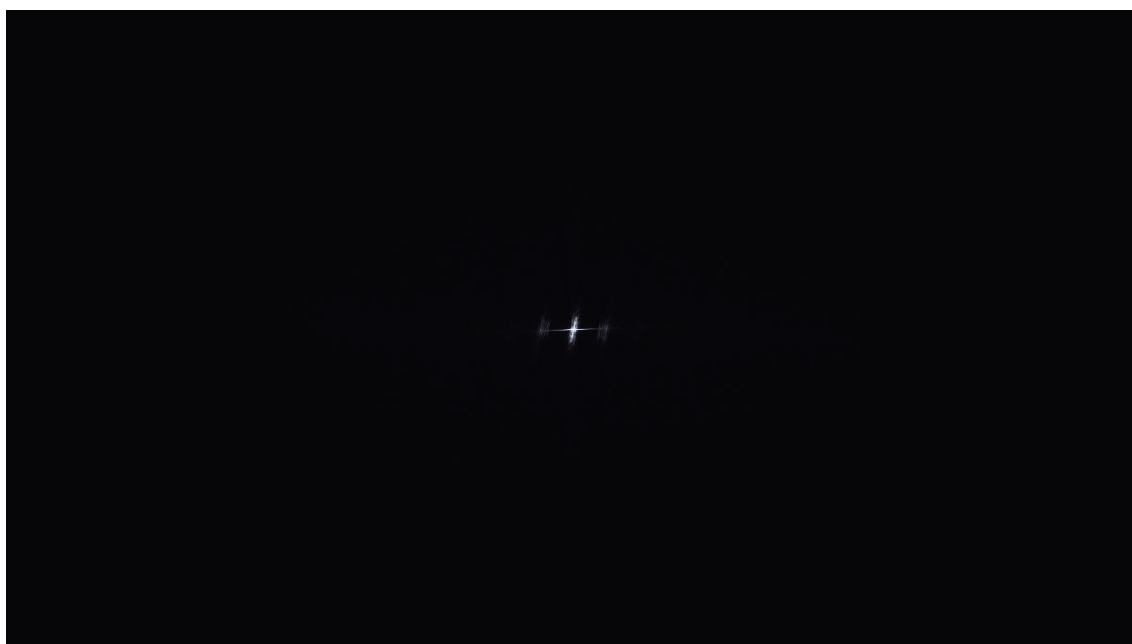


obr. 5.3.1: Simulace měření - dvě štěrby - interference



obr. 5.3.2: Experimentální ověření - dvě štěrby

V obrazcích (viz.obr. 5.3.1 a 5.3.2) je nejvýraznější rozdíl v náklonu vodorovné osy. V obrazi z programu Matlab vidíme, že nejdelší část je zcela vodorovná. V našem experimentálním ověření je tato nejdelší část odkloněna od vodorovné osy. Je to způsobeno vlastním měřením. Při měření jsem do předmětové roviny nemohl umístit obě štěrby tak, aby byly naprosto svislé, jelikož je s tímto předmětem velmi obtížná manipulace. Další rozdíl můžeme pozorovat ve středu obrazce v okolí svislé osy v místech, kde se nalézají vyšší prostorové frekvence. Tyto frekvence vytvářejí svislé rovnoběžné pruhy. Tyto pruhy jsou pozorovatelné i v experimentálním ověření (viz.obr. 5.3.2), ale okem je rozlišitelná pouze jejich část. Zbytek nejde vidět z důvodu nízké intenzity dopadajícího světla.

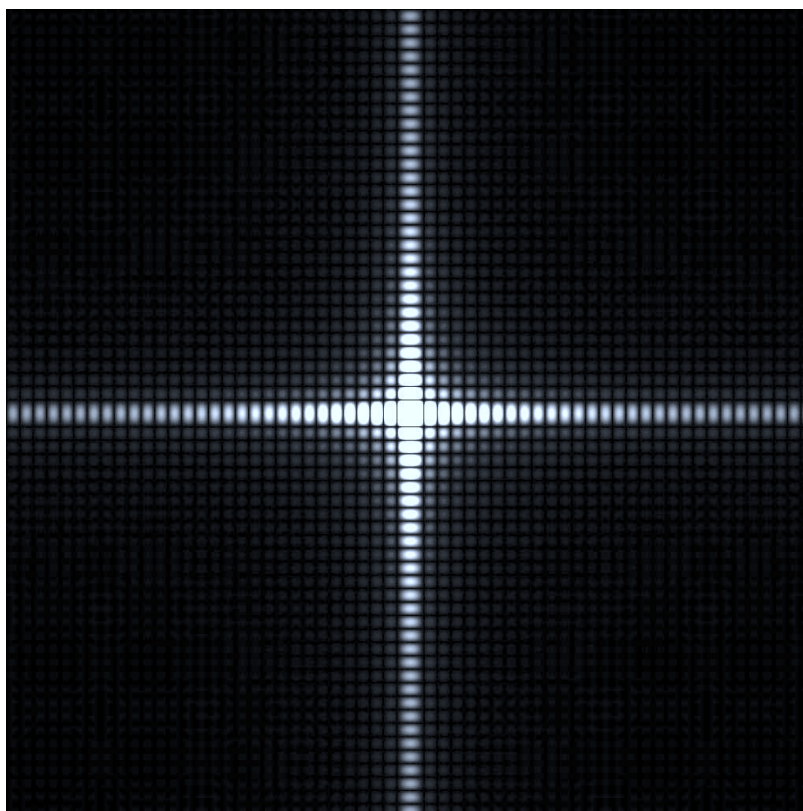


obr. 5.3.3: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - dvě štěrby

Amplitudové spektrum simulace v Matlabu (viz.ob. 5.3.3) je vlastně amplitudové spektrum rovinných vln, které bych musel použít v případě, kdybych chtěl zrekonstruovat obrazec (viz.obr. 5.3.2). Ovšem já v experimentálním ověření používám dvě štěrby, za kterými se světlo nešíří ve formě rovinných vln. Z tohoto důvodu amplitudové spektrum neodpovídá cloně v předmětové rovině.

5.4 Ověření interference při použití čtvercového otvoru

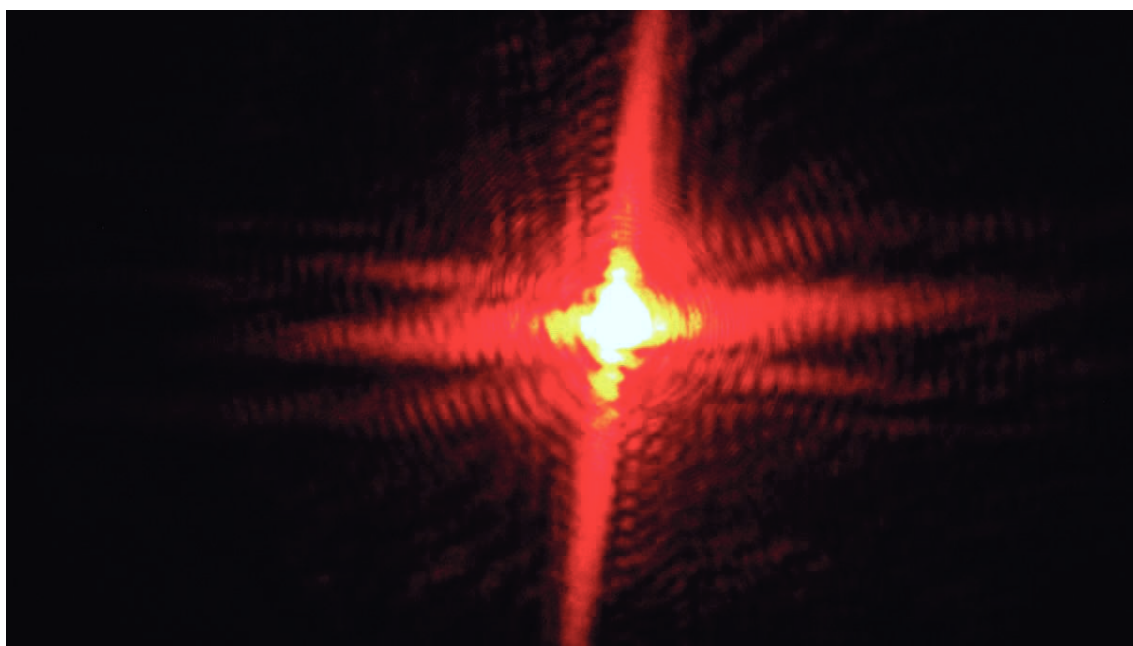
V tomto experimentu používám stejné přístroje jako v pokusu dvou pinhole (viz kap.5.1) s jediným rozdílem. Jako clonu v předmětové rovině jsem umístil čtvercový otvor. Výška a šířka čtvercového otvoru byla jeden milimetr. Opět se pokusím srovnat výsledky z programu Matlab a experimentálně ověřené výsledky.



obr. 5.4.1: Simulace měření se čtvercovým otvorem - interference

V obrazech (viz obr. 5.4.1 a 5.4.2) můžeme pozorovat určité rozdíly. Jeden z důvodů nesrovnalostí je, že v předmětové rovině umístěný čtverec nebylo možné umístit zcela podle vodorovné a svislé osy pro špatnou manipulaci s tímto předmětem. To způsobuje, že svislá a vodorovná osa jsou v experimentálním ověření mírně vychýleny.

Dalším problémem byla samotná výroba čtvercového otvoru takto malých rozměrů. Po delší snaze se sice podařilo čtverec vytvořit, ale strany nemusely být zcela rovnoběžné. Ve středu obrazce v experimentálním ověření nelze zcela rozpoznat čtverec, který byl očekáván, to je způsobeno obrovskou intenzitou dopadajícího světla ve středu obrazce a navazujícími problémy s nafocením obrazce.



obr. 5.4.2: Experimentální ověření - čtvercový otvor

Amplitudové spektrum (viz.obr 5.4.3) vypadá podle očekávání. Je téměř shodné se čtvercovým otvorem umístěným v předmětové rovině, jen má svislé hrany poněkud vytočeny. To je způsobeno nepřesným uchycením čtvercového otvoru v předmětové rovině a malými nepřesnostmi spojenými s výrobou tak malého čtvercového otvoru.

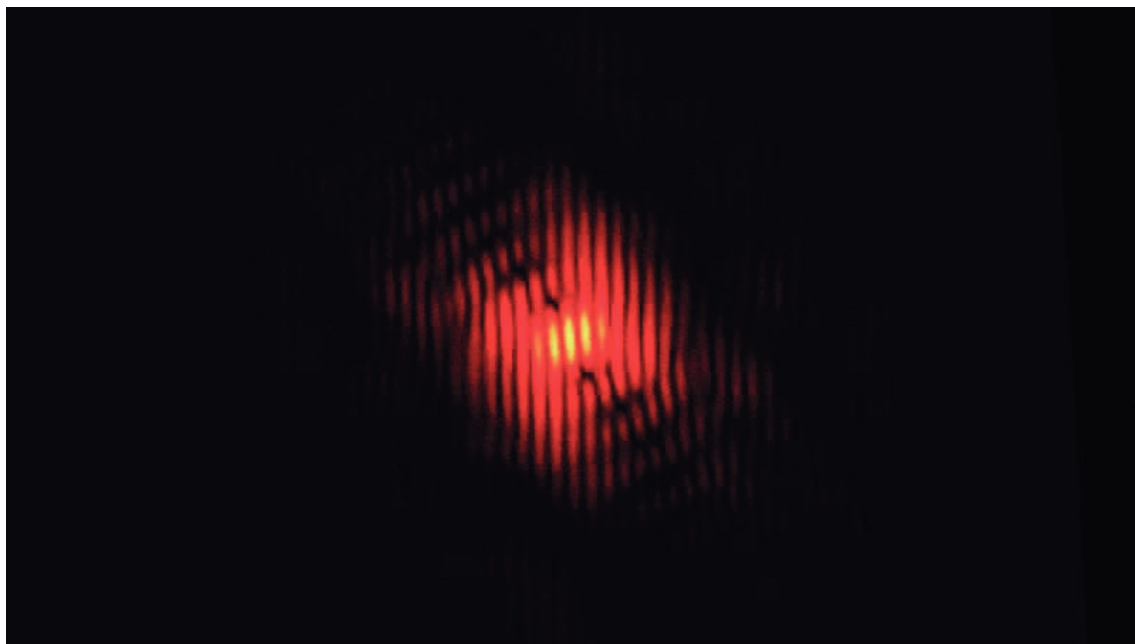


obr. 5.4.3: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - čtvercový otvor

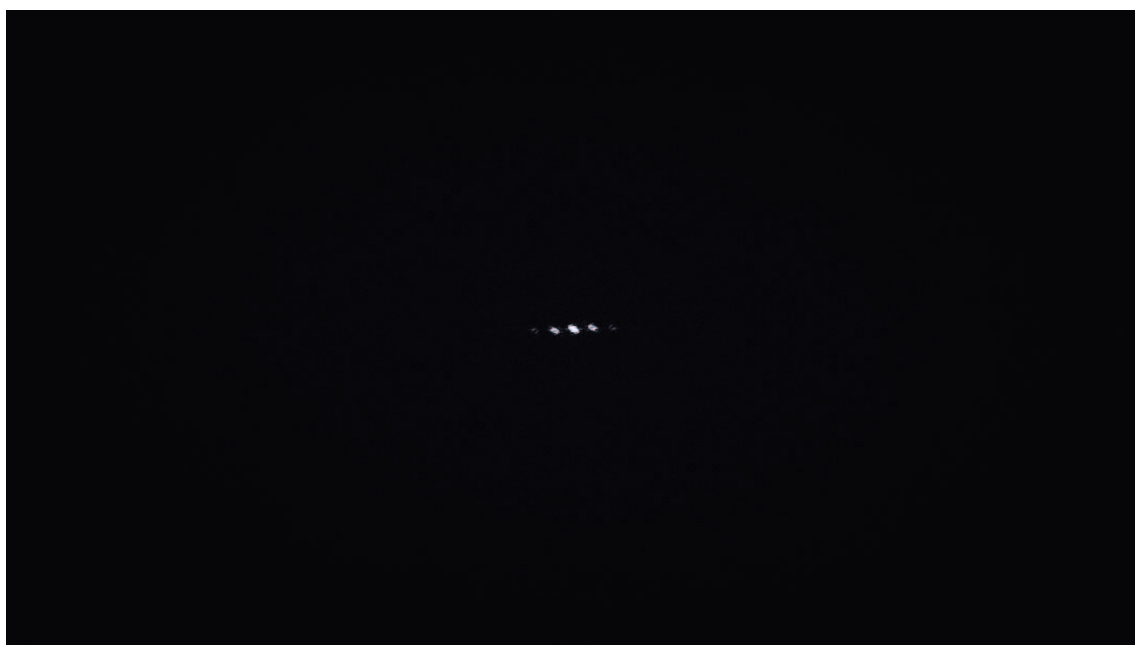
5.5 Optická filtrace ve frekvenční oblasti

5.5.1 Optická filtrace: dvě pinhole

Do předmětové roviny v soustavě 4-f jsem umístil předmět - dvě pinhole. Na tuto předmětovou rovinu jsem svítil laserem. V obrazové rovině jsem pozoroval následující obrazec (viz.obr. 5.5.1). Tento obrazec jsem vyfotil a zpracoval programem Matlab. V programu Matlab jsem vytvořil amplitudové spektrum z tohoto obrazce (viz.obr. 5.5.2). Obrazec jsem poté omezil filtry: dolní a horní propustí.

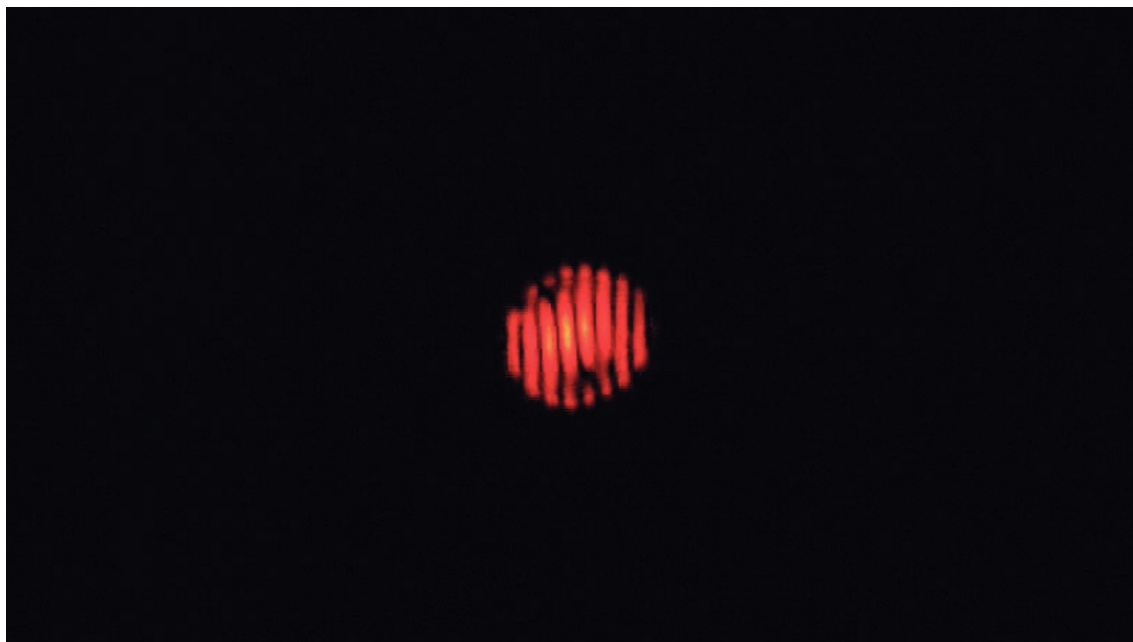


obr. 5.5.1 - Experimentální ověření: dvě pinhole - interference



obr. 5.5.2: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - dvě pinhole

Do Fourierovy roviny v systému 4-f jsem umístil filtr, nejprve dolní propust, a získal jsem celkový obrazec omezený o vysoké prostorové frekvence (viz.obr. 5.5.3). Pozoroval jsem pouze nízké prostorové frekvence získané z obrazce (viz.obr. 5.5.1). V kapitole (viz.kap. 4.1) popisují, jaký má vliv na výsledný obrazec omezení vysokých prostorových frekvencí. Mělo dojít k rozmazání výsledného obrazce. Tato teorie se nám potvrdila. Při dostatečném přiblížení jsem viděl rozdíly v ostrosti obou obrazců.



obr. 5.5.3: Experimentální ověření - dvě pinhole - interference - dolní propust

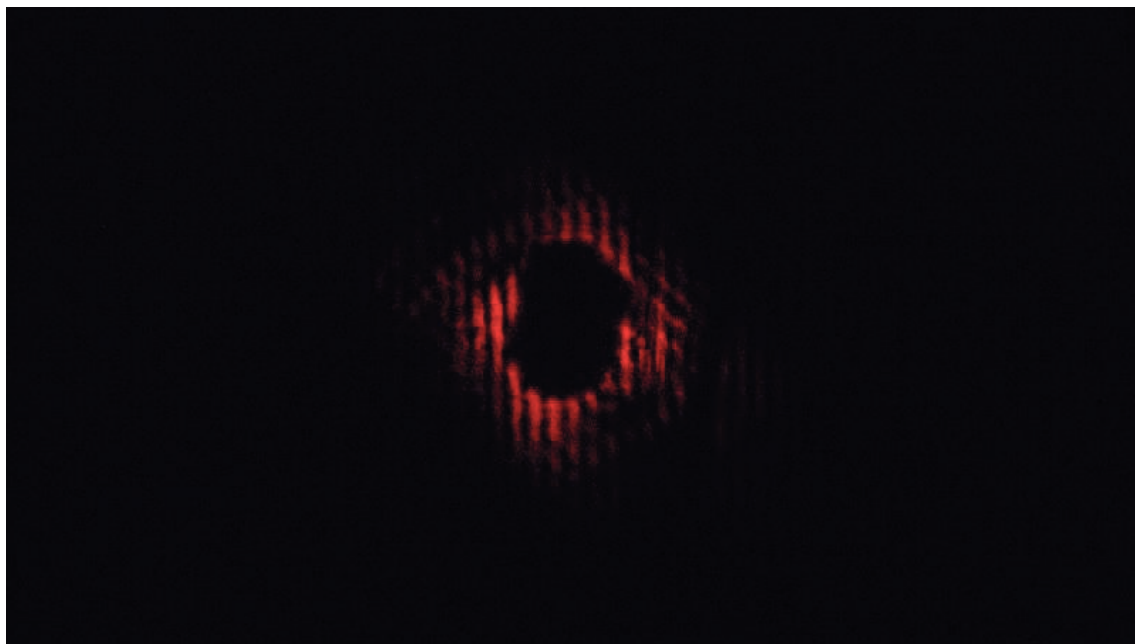
Amplitudové spektrum (viz.obr. 5.5.4) jsem získal tak, že od celkového amplitudového spektra jsem odečetl amplitudové spektrum získané z obrazce omezeného dolní propustí. Získal jsem amplitudové spektrum, které se mi podařilo omezit filtrem, dolní propustí. Jinak řečeno ukázal jsem, jaké rovinné vlny jsem byl schopen omezit filtrem typu dolní propust.



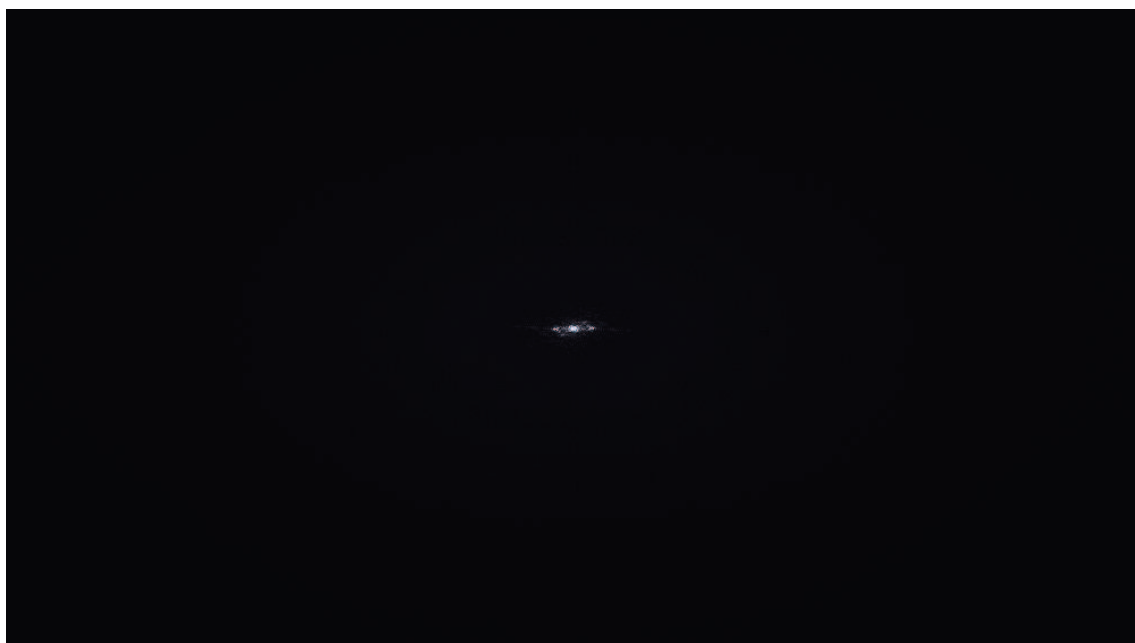
obr. 5.5.4: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - dolní propust

Do Fourierovy roviny v systému 4-f jsem umístil filtr, horní propust, a získal jsem celkový obrazec omezený o nízké prostorové frekvence (viz.obr. 5.5.5). Mohl jsem pozorovat pouze vysoké prostorové frekvence získané z obrazce (viz.obr. 5.5.1). V kapitole (viz.kap. 4.2) popisují vliv horní propusti na výsledný obrazec. Má docházet k tomu, že v místech rychlého přechodu intenzity bude obrazec výrazný. Ovšem v místech malých změn bude výrazný méně. V tomto případě (viz.obr. 5.5.5) jsem tyto vlastnosti pozoroval omezeně. Pruhy sice jdou vidět, ale došlo pouze u všech k poklesu intenzity a jen k částečnému zostření hran pruhů. Je to způsobeno malým rozostřením pruhů, které nám vzniklo při přenosu světla. Tyto přechody nebyly příliš jednoznačné, ostré, takže nedošlo k přesnému vykreslení lemů pruhů.

Amplitudové spektrum (viz.obr. 5.5.6) jsem získal tak, že od celkového amplitudového spektra jsem odečetl amplitudové spektrum získané z obrazce omezeného horní propustí. Získal jsem amplitudové spektrum, které se mi podařilo omezit filtrem, horní propustí. Jinak řečeno ukázal jsem, jaké rovinné vlny jsem byl schopen omezit filtrem typu horní propust.



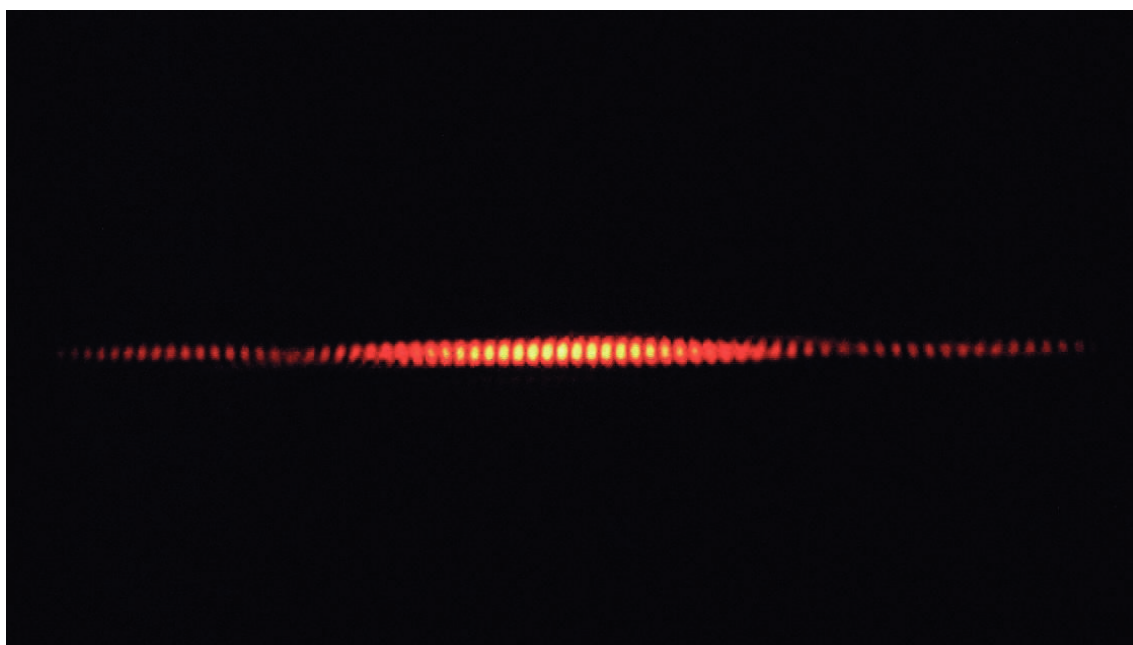
obr. 5.5.5: Experimentální ověření - dvě pinhole - interference - horní propust



obr. 5.5.6: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - horní propust

5.5.2 Optická filtrace: dvě štěrbiny

Do předmětové roviny v soustavě 4-f jsem umístil předmět - dvě štěrbiny. Na tuto předmětovou rovinu jsem svítil laserem. V obrazové rovině jsem pozoroval následující obrazec (viz.obr. 5.6.1). Tento obrazec jsem vyfotil a zpracoval programem Matlab. V programu Matlab jsem vytvořil amplitudové spektrum z tohoto obrazce (viz.obr. 5.6.2). Obrazec jsem poté omezil filtry - dolní a horní propustí.



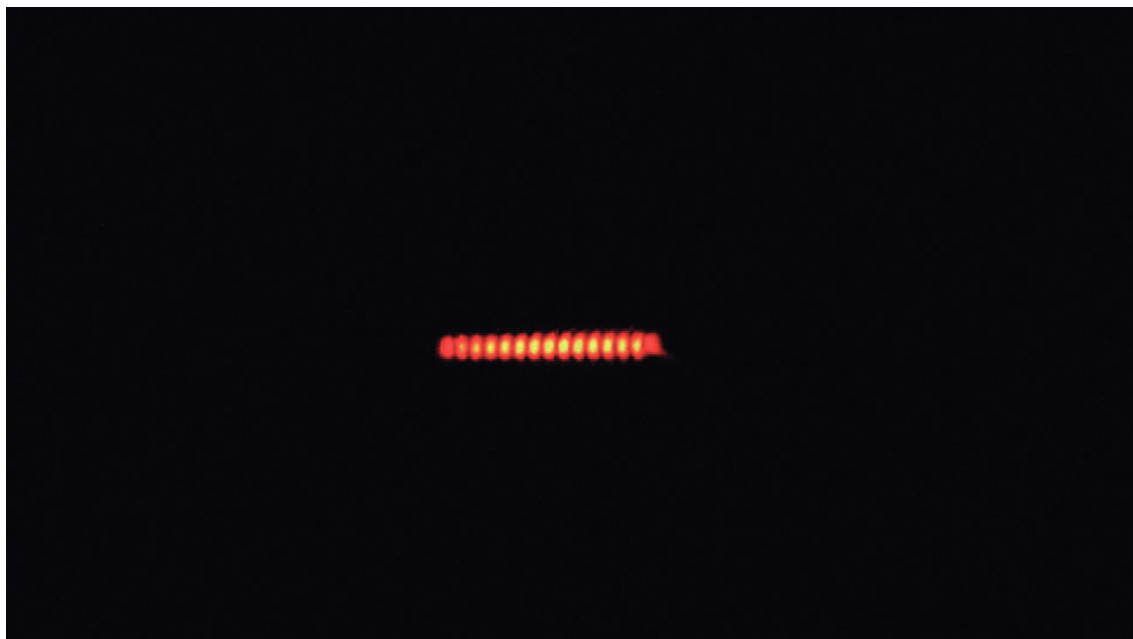
obr. 5.6.1: Experimentální ověření - dvě štěrbiny - interference



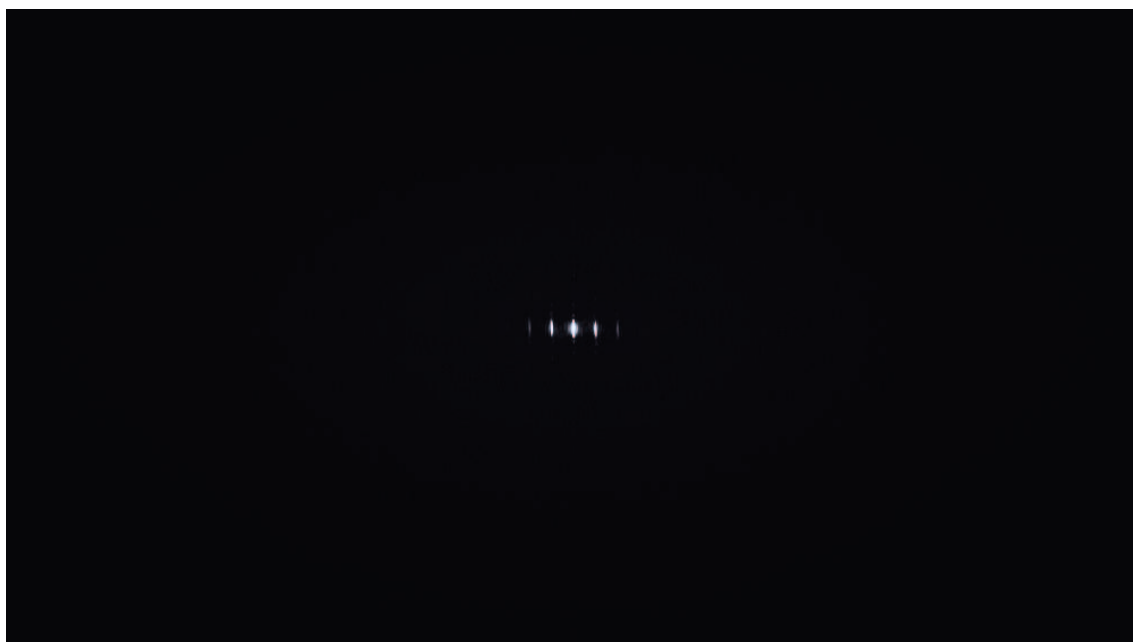
obr. 5.6.2: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - dvě šterbiny

Do Fourierovy roviny v systému 4-f jsem umístil filtr, nejprve dolní propust, a získal jsem celkový obrazec omezený o vysoké prostorové frekvence (viz.obr. 5.6.3) . Mohl jsem pozorovat pouze nízké prostorové frekvence získané z obrazce (viz.obr. 5.6.1). V kapitole (viz.kap. 4.1) popisují, jaký má vliv na výsledný obrazec omezení vysokých prostorových frekvencí. Mělo docházet k rozmazání výsledného obrazce. V tomto případě jsem pozoroval jen velmi malé změny v ostrosti obrazu. Mohlo to být způsobeno tím, že dolní propust byla moc velká, tudíž došlo k tomu, že jsem vysoké prostorové frekvence neomezil dostatečně, a tedy nedošlo k dobře pozorovatelnému rozostření obrazu.

Amplitudové spektrum (viz.obr. 5.6.4) jsem získal tak, že od celkového amplitudového spektra jsem odečetl amplitudové spektrum získané z obrazce omezeného dolní propustí. Získal jsem amplitudové spektrum, které se mi podařilo omezit filtrem, dolní propustí. Jinak řečeno ukázal jsem, jaké rovinné vlny jsem byl schopen omezit filtrem typu dolní propust.



obr. 5.6.3: Experimentální ověření - dvě štěrby - interference - dolní propust



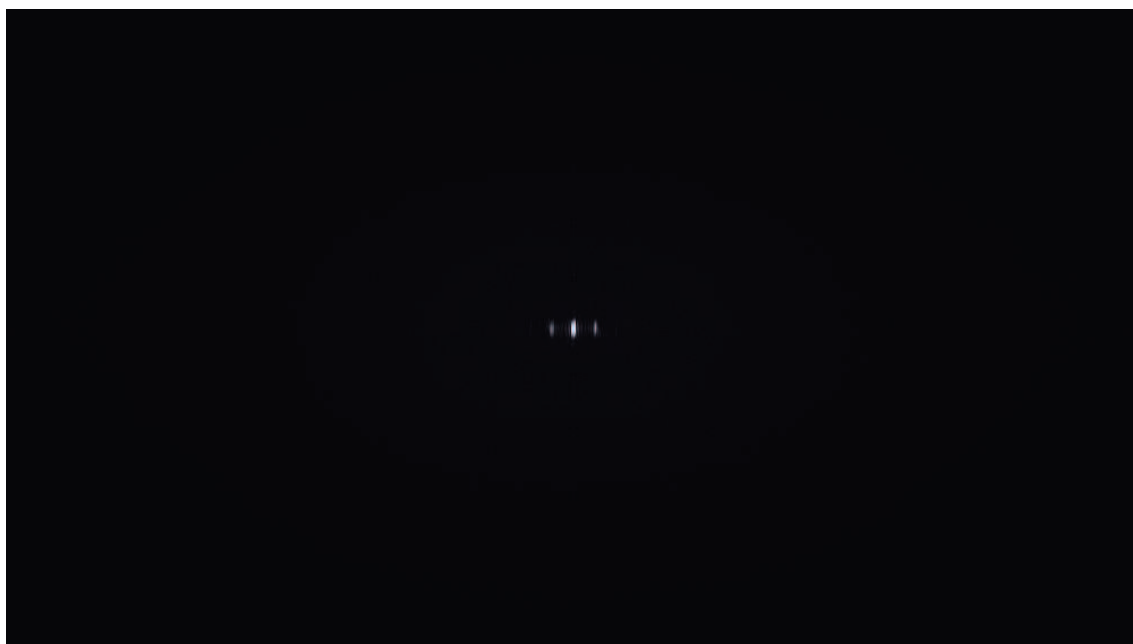
obr. 5.6.4: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - odečet



obr. 5.6.5: Experimentální ověření - dvě štěrbiny - horní propust

Do Fourierovy roviny v systému 4-f jsem umístil filtr, horní propust, a získal jsem celkový obrazec omezený o nízké prostorové frekvence (viz.obr. 5.6.5) . Mohl jsem pozorovat pouze vysoké prostorové frekvence získané z obrazce (viz.obr. 5.6.1). V kapitole (viz.kap. 4.2) popisuji vliv horní propusti na výsledný obrazec. Má docházet k tomu, že v místech rychlého přechodu intenzity bude obrazec výrazný. Ovšem v místech malých změn bude výrazný méně. V tomto případě (viz.obr. 5.6.5) jsem tyto vlastnosti pozoroval omezeně. Intenzita pruhů byla značně menší než na obrazci (viz.obr. 5.6.1). Pruhy byly ostřejší a okolo nich nebylo pozorovatelné rozostření pruhů. Takže se mi přechody pruhů vyobrazily ostřeji, ale střed pruhů zůstal podobný původnímu, jen ztratil na intenzitě. Temná místa ve středech pruhů, která jsem očekával, se mi nevyobrazila.

Amplitudové spektrum (viz.obr. 5.6.6) jsem získal tak, že od celkového amplitudového spektra jsem odečetl amplitudové spektrum získané z obrazce omezeného horní propustí. Získal jsem amplitudové spektrum, které se mi podařilo omezit filtrem, horní propustí. Jinak řečeno ukázal jsem, jaké rovinné vlny jsem byl schopen omezit filtrem typu horní propust.



obr. 5.6.6: Amplitudové spektrum - simulace v Matlabu - odečet

Závěr

V prvních kapitolách této bakalářské práce jsem se zabýval teoretickým popisem vlastností a chování světla, vlnové optiky a Fourierovské optiky.

V experimentální části této práce byla sestavena funkční optická soustava 4-f a bylo prokázáno, že v laboratorních podmínkách lze zprovoznit optickou filtraci ve frekvenční oblasti pomocí soustavy 4-f. V průběhu měření byl uskutečněn pokus tisknout předměty do předmětové roviny v soustavě 4-f na průhlednou fólii. Zde se však projevilo omezení v tisku a v zrnitosti fólie. Nepodařilo se sehnat tiskárnu s dostatečným rozlišením a fólii, která by byla zrnitá tak, aby nevznikalo zkreslení signálu. Bylo nutno využít starší, již ověřený postup - vytvoření potřebného předmětu z alobalové fólie a jeho následné umístění do předmětové roviny. Tato metoda byla velmi náročná na přesnost lidského faktoru.

Při porovnání měření s jinými, prováděnými v jiných laboratořích, dosáhl náš systém pro optickou filtraci ve frekvenční oblasti velmi podobných výsledků. Svou prací jsem potvrdil některé dílčí teorie o chování světla při dopadu na překážku a jeho dalším šíření. Následně bylo ověřeno chování horní a dolní propusti při optické filtraci ve frekvenční oblasti v soustavě 4-f.

V dnešní době se již používá optická filtrace ve frekvenční oblasti v mnoha užitečných aplikacích, jako jsou například rozlišování objektů - korelační analýza, zviditelnění slabých fázových objektů, spektrální analýza, zvýrazňování hran a tvarování paprsků v optických soustavách. Vznikají také projekty zabývající se využitím optické filtrace ve frekvenční oblasti například v oblasti teleskopie.

Literatura

[1] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C.: Základy fotoniky- svazek 1. Přel. R. M. Dušek, J. Fiala, J. Vacek. I. vydání. Praha: Matfyzpress, 1994.

ISBN 80-85863-01-4

ISBN 80-85863-00-6 (soubor)

[2] Optická prostředí. In ÚVOD DO OPTIKY [online]. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2011-03-01]. Dostupné z WWW: <http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/01_uvod/01.htm>.

[3] Snellův zákon. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 25. 3. 2011, last modified on 25. 3. 2011 [cit. 2011-04-12]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Snellův_zákon>.

[4] Základy Fourierovské optiky. In Základy fourierovské optiky [online]. Vyd.1. [s.l.] : [s.n.], [2000] [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_321.pdf>. [e-příspěvek]

[5] Interference světla. In Interference světla [online]. Vyd. 1. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2011-03-11]. Dostupné z WWW: <<http://mvt.ic.cz/dva/tef/tef-15-interference.pdf>>.

[6] Difrakce. In Difrakce [online]. Vyd. 1. [s.l.] : [s.n.], [200?] [cit. 2011-03-11]. Dostupné z WWW: <http://www.spskarvina.cz/fyzwebik/fyzweb/priklady/Difrakce_svetla_Princess_Leia.doc>

[7] BARTOŠOVÁ, Marcela. Fourierova transformace [online]. Most, 2006. 10 s. Seminární práce. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně. Dostupné z WWW: <http://gis.fzp.ujep.cz/files/0605_Furierovatransformace.pdf>.

Seznam příloh

Příloha č.1: Program pro simulaci předmětu - dvě pinhole

SIMULACE_DVE_PINHOLE.m (jen elektronicky na cd)

Příloha č.2: Program pro vytvoření amplitudového spektra

VYPOCET_AMPLITUD.zip (jen elektronicky na cd)

Příloha č.3: Program pro simulaci předmětu - dvě škvírky

SIMULACE_DVE_SKVIRKY.m (jen elektronicky na cd)